Science Council of Canada
Conseil des sciences du Canada

Discussion Paper

Emerging Sensor Technology: The Promise and the Threat

Sylvan Katz

Emerging Sensor Technology:
The Promise and the Threat

September 1987

Discussion papers are working documents. They are made available by the Science Council of Canada, in limited numbers, to interested groups and individuals for the benefit of their comments.

The views expressed in this discussion paper are those of the author and are not necessarily endorsed by the Science Council of Canada.

Copies of

EMERGING SENSOR TECHNOLOGY: THE PROMISE AND THE THREAT

are available
free of charge from:

The Publications Office
Science Council of Canada
100 Metcalfe Street
Ottawa, Ontario K1P 5M1

Vous pouvez aussi vous procurer la version française à l'adresse ci-dessus.

© Minister of Supply and Services, 1987

Catalogue No. SS21-5/1987-5E
ISBN 0-662-15563-7

CONTENTS

Executive Summary 5

Foreword 7

Acknowledgments 9

1. Introduction 11
   The Promise and the Threat of Emerging Sensor Technology 11
   Purpose of this Paper 11

2. Sensor-Based Systems 12
   System Description 12
   Sensor Sales in the World Market 12

3. Emerging Sensor Technologies and Their Markets 15
   Relative Growth of Sensor Technologies 15
   Semiconductor Sensors 16
   Fibre Optic Sensors 17
   Micromechanical Sensors 20
   Chemical Sensors 22
   Biological Sensors 25

4. Canadian Activity and Awareness 27
   Activity and Focus 27
   Academic Centres and Research Grants 27
   Industry Awareness 29
   Other Initiatives 29

5. Discussion and Recommendations 30
   Sensor Technology -- the Promise and the Threat 30
   Canada May Miss the Opportunities 30
   Need for Workshops 31
   Need to Monitor International Activity 31
   Need for an "On-Line" Information Centre for Sensor Technology 31
   Need for Greater Awareness in Canada 34

Notes 35

Appendices
A. Conferences and Organizations related to Sensor Technology 41
B. Individuals Interviewed 44

Tables
Table 1. World Sales of Sensors in 1984 14
Table 2. End-User Consumption of Sensors -- 1984 14
Table 3. Emerging Sensor Technologies: Relative Growth, by Number of Keyword Occurrences 15
Table 4. World Fibre Optic Sensor Markets 20
Table 5. Canadian Activity in Emerging Sensor Technology 28
Table 6. Focus of Canadian Activity in Emerging Sensor Technology 28
Table 7. Need for Sensor Technology Workshops 32
Table 8. Need for Industry Sector Workshops 32
Table 9. Need for a Canadian Centre for Sensor Technology 33
Table 10. Functions of a Canadian Centre for Sensor Technology 33

Figure
Figure 1. Sensor-Based System 13

Canadian industry and researchers need to be alerted to the opportunities and threats arising from emerging sensor technologies.

The Technical Importance of Sensors
Process control and analytical measurement systems are used in every aspect of industry and research. These "sensing systems" are composed of four essential components: one or more sensors, a processor, an output device, and communications link(s). In the past decade, great technological advances have been made in the processor, output device, and communications link. Until recently, advances in sensor technologies have lagged behind those in the other three components.

Rapid advances are now being made in sensor technologies internationally. In the late 1970s, research activity began to gain momentum in semiconductor, fibre optic, micromechanical, biological, and chemical sensors. Recent advances in the semiconductor sciences provide the underpinning technological foundation in each emerging sensor technology.

These emerging sensor technologies will be important for many industries. They are predicted to have the potential to provide every sector of industry with more sensitive, selective, efficient, and rugged sensing systems. They should facilitate increased productivity and profitability through more efficient processing of raw materials and manufacturing of finished goods. As well, they will stimulate the development of a new generation of innovative instruments and consumer goods.

Opportunities for R&D and Production
There is significant global demand for sensors. In 1984 world wide sales of conventional sensors were estimated to be $2.2 billion. The machinery/manufacturing ($528 million) and process control ($667 million) market sectors were the leading end-users of these sensors. Although few emerging sensor technologies have so far been commercialized, early sales and predictions indicate that they could soon capture a significant portion of the sensor market.

The substantial international interest in sensor technologies is revealed by a growing number of conferences and major studies, and by the formation of institutes and associations. Industry, governments, and universities in Japan, the United States, the United Kingdom, West Germany, and Switzerland, are collaborating to form groups, associations, and centres. A primary objective is to bring together sensor researchers from many disciplines.

Support Needed to Increase Canadian Participation
Canadian industry appears to have limited awareness of these emerging sensor technologies, at least as revealed by questionnaires and interviews conducted with researchers, industrialists, and consultants.

Canada has little research underway on sensor technology and has only two internationally recognized academic research groups, one at the University of Toronto (biological sensors) and another in Edmonton at the Alberta Microelectronics Centre (semiconductor and biological sensors). There is a smattering of individual researchers elsewhere around the country.

Canadian industry needs to become more aware of the potential of emerging sensor technologies and to identify where support could be most beneficial for fundamental R&D programs directed toward applications of specific sensors.

Responses from a questionnaire indicate a need for workshops on emerging sensor technologies and for the formation of an institute or centre for sensor technology. According to a number of specialists, their preference is less for a mortar and brick centre than for an interactive electronic centre.

Thus the author recommends that

- The Department of External Affairs, through its science and technology counsellors and technology development officers based abroad, should give priority to monitoring and rapidly disseminating information on foreign developments in sensor technologies of potential importance for Canadian industry.

- The Science Council, in cooperation with other agencies, should sponsor national workshops on emerging sensor technologies.

- The Ministry of State for Science and Technology should initiate a feasibility study to evaluate the potential for, and establish the appropriate functions of, a Canadian Centre for Sensor Technology.

- The Engineering Institute of Canada, the Chemical Institute of Canada, the Canadian Association of Physicists, and similar national science and engineering organizations should devote special sessions to sensor technology at their annual conferences.

- The Canadian Manufacturers' Association and the various relevant Canadian trade associations should alert their members to the potential of emerging sensor technologies and help identify where government support could be most beneficial for formation of a centre or institute and for fundamental R&D and technology diffusion programs directed toward Canadian applications of specific sensors.

FOREWORD

Many Canadians are now looking to new technologies to help modernize traditional industries, develop new ones, and diversify the national economic base. The Science Council's Emerging Science and Technologies (EST) program was established to contribute to those processes by facilitating the early identification of developments in science and technology that might be critical to Canada's future economic success; by defining constraints that need to be addressed; and by stimulating consensus on actions required in order to take advantage of the opportunities offered by new developments. The EST program is essentially a process of consultation.

Earlier discussion papers report

- the proceedings of a series of three workshops on advanced industrial materials and the results of a survey of workshop participants;
- the results of a survey of international and domestic experts and the proceedings of a workshop on emerging plastics technologies;
- the results of a national consultation based on, first, telephone interviews with over 200 leading scientists and engineers in the private sector, universities, and government; second, a subsequent mail survey of Canadian research managers; and third, a mail survey of over 3500 other researchers, research administrators, and others knowledgeable in science and technology. These consultations were designed to map the foresight of these experts concerning the emerging technologies that they considered to be of strategic importance for the country and to identify where there were Canadian strengths.

One technology identified by many of those approached during the national consultation was sensor technology. Sensors are rapidly being developed for use in a variety of industries. For use in sawmilling, for instance, Forintek Canada has recently patented a sensor that quickly and accurately senses the moisture content of lumber and communicates with a line computer to sort the lumber before kiln drying. And for the aircraft industry, Canadian Marconi Company is developing an early warning sensor to help aircraft avoid being struck by lightning. Canadian Marconi is building on integrated optics technology transferred from the National Research Council.

This discussion paper was commissioned as part of the Council's EST program with the primary intent to alert Canadians about the variety of emerging sensor technologies and the nature of international and domestic developments. The paper also suggests some policy initiatives and actions that may be suitable to help Canadians respond to the opportunities and threats likely to arise from these emerging technologies. The paper is being made available to share with a wider audience the views and findings of the author. It should prove a useful document, covering the topic in enough detail and at a level that can be understood by non-specialists. It provides valuable information on the technologies, their importance, the inadequacy of Canadian activities, and the lack of industrial involvement. It should be of interest also to researchers and funding organizations as a good first investigative source.

The report has been prepared by Sylvan Katz, who is a consultant with a background in molecular biology and computational science. He recently completed a two-year term as executive assistant at SCI-TEC Instruments Inc., an instrument manufacturer in Saskatoon.

Guy P.F. Steed
Associate Director of Research
Science Council of Canada

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to acknowledge the financial assistance provided by the Science Council and the Ministry of State for Science and Technology in support of the preparation of this background report; the time and interest shown by those researchers, industrialists, and consultants who participated in the interviews; and his father, Dr Leon Katz, who contributed many hours of thoughtful discussion and comments.

The author gratefully acknowledges the assistance provided by Maureen Morton and Lee-Yong Tan, Canadian Institute for Scientific and Technical Information, in gathering background information. Finally, the author wishes to thank the Science Council of Canada without whose assistance this report and its insights would not have been possible.

1. INTRODUCTION

The Promise and the Threat of Emerging Sensor Technology

Sensing systems detect physical or chemical conditions and pass this information to an operator or to another system or device. Such systems are used throughout industry and other sectors for information processing, process control, and instrumentation.

The technology for designing and producing a sensing system is reasonably mature, except for that of the sensor itself. Here, new technologies are beginning to emerge that will make possible a new generation of sensors -- sensors that are cheaper, more reliable and efficient, and able to perform many new and different tasks.

The emergence of these new sensors will revolutionize the market for sensing systems. Already the world market for conventional sensors is estimated at $2.2 billion. As the new sensors are developed and move onto the market, this volume will grow rapidly. Canadians have the opportunity to take part in this growth, both by developing and marketing new sensors and sensing systems, and by using these new systems to make existing businesses more productive.

It is important that Canadians participate in this growth. In future, we shall have to compete in a market where other sellers are offering the new generation of sensing systems, and we shall have to compete with businesses that are using the new systems to operate more productively and efficiently. Our competitive position will be uncertain if we do not now begin to investigate the emerging sensor technologies and make plans for their future use.

Purpose of this Paper

The author undertook this survey to collect information on current activities in Canada and internationally that relate to the emerging sensor technologies. He also endeavoured through questionnaires and personal interviews to find out what support Canadian researchers and industry thought would be useful. This discussion paper has been prepared to make this information available to interested parties.

The paper is designed to alert Canadian industry and researchers to developments in emerging sensor technologies; to provide a brief overview of international and Canadian research, development, and commercialization activities; and to recommend policy initiatives and actions suitable to help Canadians respond to the opportunities and threats likely to arise from these emerging technologies.

The paper will focus on emerging sensor technologies only and not on sensing systems. There is little doubt that the majority of the economic revenues will be generated from the sales of sensing systems and not the sensor. However, in order to capitalize on the development and use of these new sophisticated sensing systems there has to be significant networking within and between research and industrial communities, and a basic awareness of the emerging sensor technologies.

R&D in these technologies is complicated by the fact that substantial inter-disciplinary effort is usually needed to combine information from physics with chemistry and biology to produce sensors capable of accurately and selectively measuring minute changes in physical, chemical, and biological parameters.

2. SENSOR-BASED SYSTEMS

System Description

Sensor-based systems detect physical or chemical conditions of interest and pass this information in suitable form to an operator or to another system or device. These systems are composed of four essential components: sensors, processors, output devices, and communication links (see Figure 1).

A **sensor** is an input device that transduces a physical or chemical parameter into an electrical or optical signal. Physical parameters that are commonly monitored with sensors include temperature, pressure, force, magnetic field, and motion. Chemical parameters of interest most often are the presence or concentration of chemical or biological substances.

A **processor** converts sensor information into a form suitable for output. In recent years processor technology, specifically microprocessor technology, has advanced rapidly. And this advance continues with miniaturization, increasing speed and word size, reduced programming complexity, and increased manufacturing yields.

An **output device** presents the processed information to a user, to an actuator, or to another system. The nature and quality of output devices has improved over the past decade resulting in such output devices as liquid crystal, plasma, and electroluminescent video displays. As well, cheap and rugged actuators have been developed primarily due to developments in advanced materials.

A **communication link** provides a path for the transmission of an electrical or optical signal from the sensor to the processor, or from the processor to the output device. Typically, the path is wire, optical fibre, or an electromagnetic link (for example, a radio frequency satellite link). Communication links are still evolving. For instance, better materials and manufacturing processes have produced monomode optical fibre that minimizes signal attenuation.

These four components are needed to build a sensing system. Yet it is the sensor itself that distinguishes these systems from others. Sensor technology is the very foundation of all information processing systems, process control systems, and instruments of all kinds. After all, a processor without a sensor would have nothing to compute. And a process cannot be controlled without a sensor to determine the current state of the process. Indeed, an instrument without a sensor, by definition, is not an instrument.

Sensor Sales in the World Market

Now that technological advances have lowered the cost of microprocessors and analog-to-digital converters, the cost of the sensor has become a significant portion of the cost of a sensing system. Hence, there is considerable economic pressure to decrease the cost of the sensor. And most industries want sensors that are not only better priced but also more accurate, reliable, selective, and rugged for process control and measurement.

Western world sales for all types of sensors have been estimated[1] at $2.2 billion. The major suppliers (Table 1) are the United States, Western Europe, and Japan. The largest end-users (Table 2) of these sensors are the process control (34 per cent) and machinery and manufacturing (24 per cent) sectors.

Emerging sensor technologies are just beginning to penetrate these well established markets. As the new technologies mature, they will produce lower priced sensors with improved accuracy, reliability, and selectivity; and these new sensors will displace many existing sensor technologies.

Figure 1. Sensor-Based System

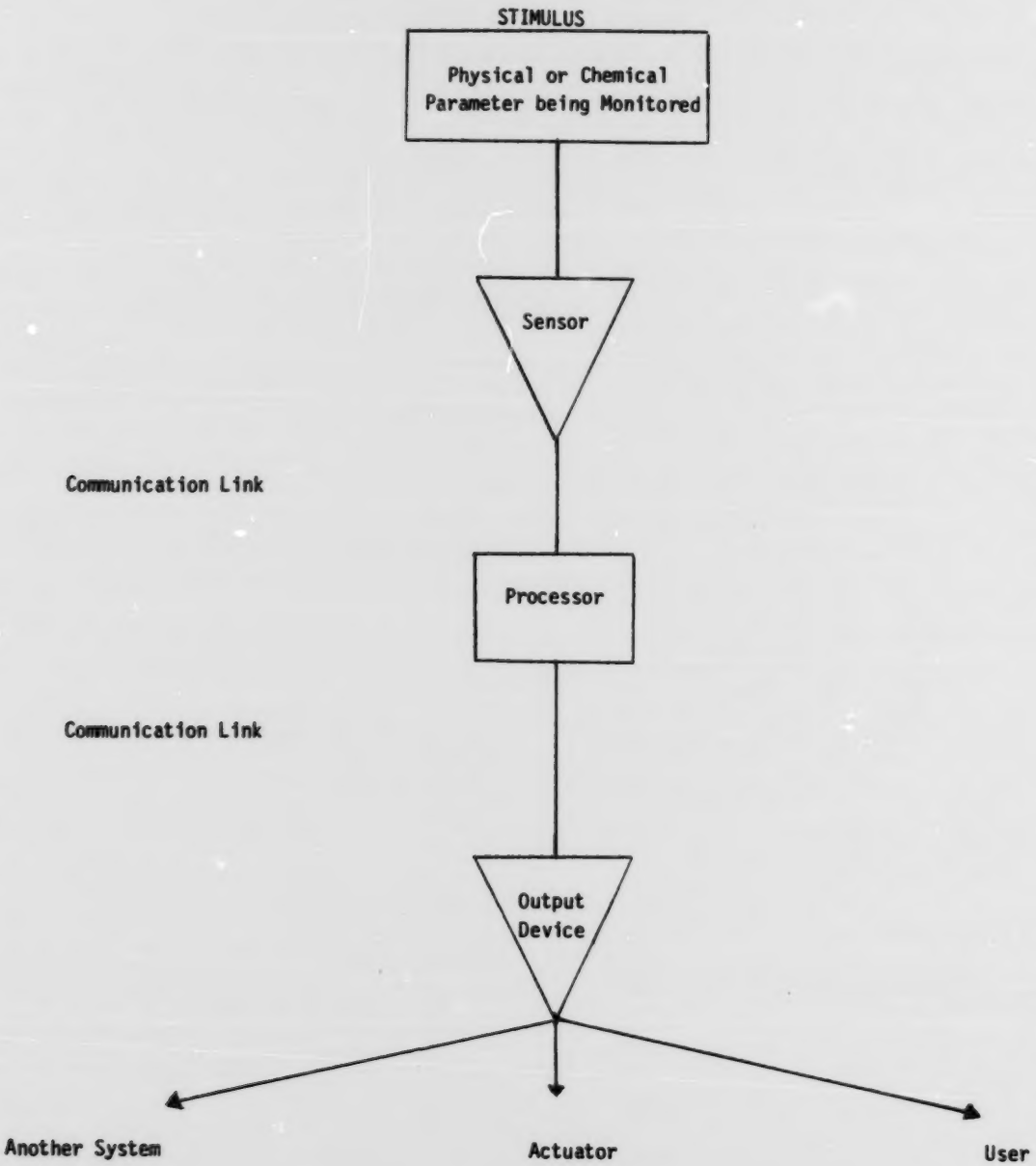

Table 1. World Sales of Sensors in 1984

Supplier	Value ($M U.S.)	Percentage of Total
United States	$1016	46
West Europe	788	35
Japan	425	19
Others	small	0
Total	$2229	100%

Source: Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, Market Intelligence Research Company, Palo Alto, Calif.

Table 2. End-User Consumption of Sensors -- 1984

Category	Value ($M U.S.)	Percentage of total
Aerospace & Defense	$347	16
Consumer & Automobile	214	10
Energy & Environment	242	11
Machinery & Manufacturing	528	24
Scientific & Medical	231	10
Process Control	667	30
Total	$2229	100%

Source: Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, Market Intelligence Research Company, Palo Alto, Calif.

3. EMERGING SENSOR TECHNOLOGIES AND THEIR MARKETS

Relative Growth of Sensor Technologies

In recent years, research into sensor technology has increased dramatically in five areas:

- semiconductor;
- fibre optic;
- micromechanical;
- chemical;
- biological.

This growth is confirmed by the increasing number of research papers being published on these topics. The abstracts in the INSPEC and COMPENDEX databases were searched[2] for the occurrence of the keywords "fibre optic sensor," "biological sensor," "chemical sensor," and "micromechanical sensor" (and appropriate variants) for each year from 1980 through 1985.

The results of this keyword count are tallied in Table 3. The evidence indicates that fibre optics has been the most active area of research in new sensor technologies. Of all the research papers published in this period on emerging sensor technology, 75 per cent were on fibre optic sensors. There were only 14 per cent on biological sensors, 10 per cent on chemical sensors, and less than 1 per cent on micromechanical sensors. The last three areas are relatively new and the level of research activity in them should overtake that in fibre optics in the next few years.

The growing interest and activity in sensor technology is also revealed by the number of recent conferences devoted to the topic, the formation of associations, centres, and institutes, as well as the

Table 3. Emerging Sensor Technologies: Relative Growth, by Number of Keyword Occurrences

	Sensor Type			
Year	Fibre Optic	Biological	Chemical	Micromechanical
1980	18	1	4	0
1981	32	6	7	0
1982	49	5	13	1
1983	93	9	13	1
1984	295	57	35	1
1985	268	57	26	4
Totals	755	135	98	7

Source: INSPEC and COMPENDEX Databases, Canadian Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa

completion of major studies and the compilation of databases. Appendix A contains a listing of some conferences and organizations involved with sensor technology.

The rest of this chapter is divided into sections, one section for each of the emerging sensor technologies: semiconductor sensors, fibre optic sensors, micromechanical sensors, chemical sensors, and biological sensors. Each section describes an emerging sensor technology, its projected market potential, and some possible applications.

Semiconductor Sensors

Semiconductor material (silicon) is ideally suited for transducing physical phenomena into electrical signals, usually analog, which can then be converted to digital information for use by microprocessors. Silicon sensors respond predictably to changes in pressure, deflection, acceleration, chemical composition, temperature, light, sound, radiation, and magnetic waves.

Silicon is resistant to corrosion and tolerant over a wide temperature range. It can operate in the megahertz frequency range, withstand pressures greater than 345 000 Kpascal, and accelerations up to 100 000 g. Typically, a silicon sensor maintains measurement accuracy better than 0.1 per cent over many years of continuous operation. Silicon sensor development and production is based on the same fundamental technology used in integrated circuit production. Several hundred silicon sensors can be batch-fabricated on silicon wafers at the same time. This mass-production technique helps reduce the unit cost of sensors and maintains uniformity.

Some manufacturers are beginning to design silicon microsensors with integrated electronics. The major advantage of integrated sensors is that relatively weak signals from the sensor can be enhanced for processing.

United States Research

At the University of California, Berkeley, researchers have micromachined a single chip sensor[3] that has an infrared detector, tactile sensor, anemometer, multiple accelerometers, gas sensor, and a CCD imager.

Motorola[4] introduced its MPX100 pressure sensor in 1980. This simple silicon pressure transducer is based on a single resistor configuration that is more reproducible and easier to temperature compensate than a four-resistor Wheatstone bridge. In 1984 they introduced their MPX2000 series that integrates passive resistors and gives full temperature compensation and calibration. In the fall of 1986 they introduced their MPX3000 series pressure transducer. It incorporates a shear-stress strain gauge, temperature compensation, and voltage amplification on a single chip. The device sells for $60 (US) in quantities of 100.

Concha Corp. (California) has just started to market a tire-pressure monitoring system based on a semiconductor sensor manufactured by Transensory Device Inc. (Fremont, California). The system is installed on the tire rim and warns the driver when the tire pressure is low. Tire-pressure monitoring is important in cars with anti-skid braking systems because the operation of these systems can be impaired if one tire is underinflated.

Semiconductor Sensor Market

The total United States sensor market is approximately $1 billion annually[5] and growing at the rate of 15 per cent each year. It is estimated that semiconductor sensors account for about one-fifth of the total market. Semiconductor sensors play an underpinning role in each of the other emerging sensor technologies.

Semiconductor sensor technology is being investigated at the Alberta Microelectronics Centre in Edmonton by the magnetic sensor

group, which is composed of three faculty members and two master's degree students. This research focuses on lateral magneto-transistors (LMT) that can be incorporated into magneto-darlington (MD) devices for use in a remote field eddy current inspection system. Other potential applications are geomagnetic measurements, reading of magnetic storage media, recognition of magnetic ink patterns on bank notes or credit cards, contactless switching, linear and angular displacement detectors, and integrated watt-hour meters. The previous work of the group includes design and characterization of magnetic-field sensitive MOSFET structures (MAGFET), a magnetically controlled oscillator, and a vertical Hall device. This group maintains close contact with researchers and industry in Japan and Switzerland.

Other activities at the Alberta Microelectronics Centre include numerical modelling of semiconductor devices, fundamental research in deposition and properties of thin film materials and application of thin film coatings to the development of novel sensor devices. The focus of all these activities is research into developing new sensor technology.

At Simon Fraser University, S.R. Morrison and R.F. Frindt in the physics department are researching semiconductor gas sensors. Also, in cooperation with a local company, they are investigating a gas sensor for carbon dioxide detection in recreational vehicles and automobiles.

Fibre Optic Sensors

Until recently, optical fibre was thought of primarily as a replacement for conventional copper-based transmission lines. Fibre optic transmission lines facilitate high density voice, video, and data communications. In the late 1970s articles describing fibre optic sensors began to appear in research and sensor applications journals.

There are two fibre optic sensor categories: intrinsic and extrinsic. In intrinsic sensors, the optical fibre changes physically in response to the physical or chemical parameter being monitored, for example, a change in the index of refraction of the optical fibre or in modal distribution. Extrinsic fibre optic sensors use the optical fibre as a transmission line to convey modulation of light intensity, phase, polarization, wavelength/spectrum, or time (and its inverse, frequency).

Fibre optic sensors have several advantages[6] over other sensor technologies:

- high sensitivity;
- geometric versatility;
- immunity from electromagnetic interference;
- compactness, light weight;
- durability;
- remote measurement simplicity;
- elimination of electrical shock hazard;
- corrosion resistance.

Fibre optic sensors are used to make electrical, mechanical rotation, thermal, magnetic, and acoustic measurements. Before the end of the century we could see extensive use of light (photonic) sensor systems,[7] in medical applications, petrochemical plants, the gas/oil industry, avionics, automotive and underwater applications, environmental and agricultural control systems, and military instrumentation, as well as in the power and manufacturing industries.

Medical Applications

Currently, fibre optic sensors[8] are rapidly penetrating the medical instrumentation markets. They are being used in applications ranging from the measurement of intracranial pressure to indwelling blood gas catheters. Their increased medical use stems from the fact that they are small, highly sensitive, electronically isolated, chemically inert,

and extremely durable. The leading uses of fibre optic medical sensors are in blood chemistry, oximetry, temperature, and pressure measurements. It is estimated that fibre optic sensors are used in half the 370 000 open heart operations performed each year. This market alone represents $20 million[9] each year.

Industrial Applications

Flexible light guides (optical and plastic fibre) are regularly used in industry to provide illumination for inspection and indication purposes, particularly where there is a risk of explosion or when mechanical isolation is required. Also, infrared thermometry using flexible light guides is used to measure the temperature (up to 1850 degrees Celsius) of difficult-to-access surfaces in jet engines, injection moulders, induction furnaces, and continuous casting operations.

The majority of the fibre optic sensors that are penetrating industrial markets are extrinsic sensors. They are used to measure physical parameters such as pressure and temperature. For example, a commercially available pyrometer uses an optical fibre thermometer[10] consisting of a small black body cavity sputtered on the end of a sapphire rod connected to an optical fibre. The radiance from the cavity is used to measure temperature. At 1000 degrees Celsius a one per cent change in temperature causes a 20 per cent change in the radiation flux with an uncertainty of 0.05 per cent (100 times better than thermocouples). This device has recently been accepted by the National Bureau of Standards as a standard device for measuring temperature between 630.74 degrees Celsius (melting point of aluminum) and 1769 degrees Celsius (melting point of platinum). This optical fibre thermometer has a resolution of one part in 10 million and a drift of less than one part in 10 million per hour.

A number of lower temperature optical fibre sensors[11] have been developed. Some temperature sensors utilize phosphor compounds. Phosphor is a photoluminescent material with light-emitting properties that vary proportionately with temperature. The phosphor at the tip of an optical fibre is excited by radiation from a light source, and the resulting emission is detected and analysed to determine the state of its temperature-dependent characteristics.

OpTech (Herdon, Virginia) manufactures an extrinsic fibre optic pressure sensor. It measures the displacement of a reflecting diaphragm. An LED transmits light through a single fibre cable to the diaphragm. The diaphragm reflects light back into the optical fibre. The intensity of the reflected light indicates the displacement of the diaphragm due to the exerted pressure. This pressure sensor works over a 0-3500 Kpascal range in a temperature range from -55 to +125 degrees Celsius with a full scale accuracy of one per cent and a full scale resolution of 0.05 per cent.

An extrinsic toxic chemical sensor capable of detecting concentrations as low as a few parts per billion[12] has been developed at Lawrence Livermore National Laboratory. This optical tunneling remote sensor was honoured by Research and Development magazine as one of the top 100 technical products in 1985. A small amount of a colour reagent and a fluorescent chemical are applied to a porous glass tip, smaller than a grain of sand. A change in one colour reagent molecule affects the light of 1000 fluorescent molecules, making the optical tip, in effect, an optical amplifier. This sensor is used to measure hydrogen sulphide and nitrogen oxides. Nitrogen oxides are by-products of the degradation of chemical explosives.

Intrinsic fibre optic sensors are also beginning to enter the market, although not as rapidly as extrinsic sensors. For example, the British Gas Corporation[13] stores cryogenic liquids, primarily liquefied natural gas, and uses an optical fibre leak

detector. By carefully choosing the refractive index of the fibre core and cable cladding so that they converge with decreasing temperature, a temperature-sensitive fibre optic loop can be created. A small leak from a cryogenic liquid can be detected within 5 seconds. The estimated mean-time-between-failure for the sensor is 14 years. Normally, leak detection of cryogenic liquids is monitored by using a large number of point-sensing thermocouples. Not only is this fibre optic sensor easier to install than thermocouple sensors but it also has lower maintenance requirements.

Canadian Research in Industrial Applications
Until recently, J.P. Legendre in the National Research Council's (NRC) electronics engineering section was actively investigating fibre optics sensors. He has developed a fibre optic reflectometer for measuring the change in the index of refraction in fluids. This device may be useful for such measurements as testing for contamination of fluids such as freon (used in the refrigeration industry) by oil.

Dr Legendre has shown its potential as a temperature sensor. A captive volume of fluid (acetone) was attached to the end of an optical fibre. The reflectometer was used to measure the change in refractive index as a function of temperature. The device has a temperature resolution of 0.005 degrees Celsius over the temperature range of 5-50 degrees Celsius.

The reflectometer research resulted in a Canadian patent and a U.S. patent pending. The reflectometer is being handled by the Canada Patents Development Ltd. Recently, NRC asked Dr Legendre to wind down his fibre optic sensor research.

Military Applications
Significant military funding for intrinsic optical fibre hydrophones and gyroscopes has resulted in a number of practical devices. Commercial fibre optic rotation devices are being tested by military and civilian users in applications ranging from guidance systems in tactical weapons to aircraft avionics and gyrocompassing. Thomson-CSF (Corbeville, France) has developed a fibre optic gyroscope[14] with a drift rate of 0.3 degrees per hour and a volume of 0.1 litre. A fibre optic gyro[15] has been used in an oil-drilling tool to survey boreholes. It was used for azimuth angle determinations inside steel casings and in drill strings. This technique does not require the borehole to be fitted with non-magnetic drill collars. The gyro operates to a depth of 6000 metres over a temperature range of 0-125 degrees Celsius, withstands shocks of 1000 g for 0.5 milliseconds, and vibrations of 40 g up to 2000 Hertz. There are about 20 companies worldwide working on fibre-optic gyroscope technology.

Telemetry
Telemetry over distances of 100 metres, and up to 1 kilometre in some cases, is common in processing plants. Normally a large number of sensors are used. Clearly a multiple access multi-sensor optical fibre system would be useful in process control applications. A multiple access optic fibre scanner[16] based on a rotary stepper motor has been developed to scan 24 optical fibres. An experimental optical fibre sensor demonstration unit[17] has been developed to advance the possibilities of using optical sensors and fibres in industry and of being able to activate supply control valves via a signal sent down an optical fibre. The demonstration incorporates eight optical sensors (six pressure sensors, a temperature sensor, and a flow sensor), a central multiplexer, a monitoring unit, and some actuators.

Optic Sensor Market
Worldwide fibre optic sensor sales[18] have been projected to expand from $26.3 million in 1985 to $259.61 million in 1994. A breakdown of sales by sensor application is given in Table 4.

Table 4. World Fibre Optic Sensor Markets ($M)

	1985	1990	1994
Gyroscopes	-	9.28	43.77
Hydrophonics	-	2.48	8.25
Aircraft Engine Monitoring	1.48	5.85	9.35
Automobile	-	6.00	46.00
Machinery and Manufacturing	7.00	23.00	40.00
Medical	13.82	42.60	69.24
Process Control	4.00	23.00	43.00
Totals	$26.3M	$112.21M	$259.61M

Source: Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, Market Intelligence Research Company (MIRC), Palo Alto, Calif. (1985)

Electronicast Corp (Redwood, California)[19] projected fibre optic sensor sales would be $32.6 million in 1986, $188 million in 1990, and $818 million in 1994. These projections were for the sale of sensors only. This is approximately three times MIRC's projections. No matter which is correct, when fibre optic sensors are integrated into systems, it is reasonable to project that sales will be in the billions of dollars by 1994.

A recent study of the $6.7 billion world market for optical fibres[20] predicts that by the year 2000 about 70 per cent of the market will be in the field of optical fibre sensors, which will be dominated by gyroscopes and sensors for military use. At least 15 per cent of the sensors (over $1 billion) will find their way into industrial and medical applications.

Japan's Optoelectronic Industry and Technology Development Association (OITDA) reported[21] that optical fibre sensors accounted for $10 million (0.8 percent) of its $1.25 billion optoelectronics sales in 1984.

In sensors, as in most major new technology, "technology push" is the active force, but already "market pull" is beginning to have some influence[22] on the sale of fibre optic sensors.

Micromechanical Sensors

Micromechanical devices[23] are constructed from silicon using micromachining techniques. Micromachining allows silicon to be made into mechanical devices as small as microelectronic devices. The techniques used are similar to the batch fabrication methods

employed in the manufacture of integrated-circuit chips. In addition, micromachining uses chemical etching techniques to form three-dimensional shapes such as pits, holes, pyramids, trenches, hemispheres, cantilevers, diaphragms, needles, and walls.

Applications

A large variety of mechanical devices can be formed from a combination of these structural elements. Some silicon micromechanisms that have been developed are valves, springs, mirrors, nozzles, connectors, printer heads, circuit boards, heat sinks, and sensors for pressure, acceleration, and chemical concentration.

A gas chromatograph, an instrument for identifying gases in an unknown mixture, has been built on a disk of silicon[24] a few centimetres in diameter. This instrument is portable. It can be used to monitor air quality or measure the energy content of the gas in a natural gas pipeline.

A high capacity micromachined heat sink[25] has been developed. Small grooves are micromachined into a silicon wafer. A liquid coolant is cycled through the grooves and high speed electronic devices are fabricated on the outside surface. Because silicon has a high thermal conductivity, these devices have a high cooling efficiency. These heat sinks can dissipate more than 1000 watts per square centimetre.

Accelerometers and pressure sensors integrated with signal conditioning on the same silicon wafer as the sensor are under development. An accelerometer, designed by the IBM San Jose Research laboratory,[26] consists of an oxide beam suspended over a shallow well. A metal lever and the flat silicon on the bottom of the well act as two plates of a variable air capacitor. A lump of gold is formed on the free end of the lever. If the chip is moved suddenly, the inertia of the gold weight causes the beam to flex, changing the air gap and hence the capacitance. This instrument has a sensitivity of two millivolts per g.

Litton Industries[27] expects micromachined accelerometers to be one tenth the size and weight of current accelerometers and inexpensive enough to use in guidance systems for missiles.

The most successful micromachined silicon sensors at present are pressure sensors. There are two basic types: piezoresistive and capacitive sensors. The electrical resistors etched on a thin flexible diaphragm of a piezoresistive sensor change resistance as the diaphragm flexes. In the capacitive sensor, the flexible diaphragm is one plate of a variable air-gap capacitor.

Japan's NEC Corp.[28] thinks that micromechanical pressure sensors might prove useful in vacuum cleaners, where they could automatically adjust the machine for different types of carpets. Millar Instruments Inc. (Houston, Texas)[29] mounts them at the end of a catheter, creating a blood pressure monitor only one square millimetre in cross-section that takes sensitive readings inside a blood vessel.

Micromechanical sensors are being integrated with a processor on the same silicon wafer. Integrated sensors have a high immunity to noise and leakage. They have a wide variety of applications: for example, in harsh environments such as under the hood of a car or in biomedical monitoring. Also under development are single silicon chips with several types of sensors, such as temperature and pressure. In the future, micromechanical sensors will be able to sense an analog signal and convert it to a digital signal on the same chip.

Silicon is not the only material being micromachined.[30] Gallium-arsenide and certain ceramics are also being used because of their high resistance to heat. Hitachi has developed a ceramic-chip "nose" that can

identify 30 different gases at very low concentrations. Yokogawa Hokushin Electric Corporation[31] is working on a tiny micro-machined strain sensor made from quartz crystal. Mounted on structural members of bridges or aircraft, it could warn of potential disasters such as bulk-head failure.

The general manager of Schlumberger Ltd.'s Solartron Transducer[32] group indicated that worldwide there are only 40 to 50 experts in micromachining technology. Fear of not having ready access to these experts has prompted Schlumberger to buy a stake in NovaSensor, a producer of micro-mechanical chips founded in 1985 by three researchers from IBM, Honeywell, and Kulite Semiconductor.

Micromechanical Sensor Market

Mackintosh International, a London-based market researcher, says worldwide sales[33] of micromechanical devices have grown to $250 million. By 1990, the firm estimates, the figure will grow to at least $630 million. Major companies in Europe believe they can parlay their skills in micro-mechanical engineering into a major share of the market.

An executive at PA Technology[34] in Belgium predicts that European sales of micromechanical sensors will grow faster than sales in the United States or Japan. He predicts European producers will boost their share of world business to 22 per cent by 1990, up from 17 per cent now.

Chemical Sensors

Chemical sensors are solid state, chemically sensitive devices. Their development has been made possible due to advances in micro-lithography for the manufacture of micro-processors and integrated circuits.[35] To make the new chemical sensors, thin films of metals, dielectrics, and semiconductors are vacuum-deposited on a silicon substrate. Sensor operation is based on the interaction between the deposited material and the chemicals with which it comes into contact.

Chemical sensors[36] are being developed primarily to measure the concentration of chemical substances. The number of chemical substances of interest for measurement is almost infinite. The number of different gas pollutants in the air or the number of proteins in the human body is so high that selectivity and specificity is a necessary property of chemical sensors.

The applications for chemical sensors are innumerable. Chemical analysis is carried out, or should be carried out, in almost all areas of technology. Most obvious[37] is the use of chemical sensors in chemical laboratories, in medical clinics, industrial processes, and bioreactors. Conceivable applications might be for monitoring food freshness in stores, field analysis of plants and soil, portable air-pollution monitors, and many more.

Medical Applications

Medical diagnosis[38] makes significant use of chemical analysis and large numbers of tests are carried out in clinical laboratories. Traditional medical chemical analysis, however, is expensive and slow. Chemical sensors that are cheap, rugged, and easy to use will facilitate decentralization of chemical analysis to the hospital wards, general practice, and even the home. Chemical sensors are being developed for continuous monitoring of chemical parameters during intensive care. Equipment for monitoring anaesthetic gases, blood gases such as oxygen and carbon dioxide, and also acidity, are in use today. Also, chemical sensors for monitoring potassium and calcium and other substances are being developed.

Canadian Research in Chemical Sensors

At the Alberta Microelectronics Centre a glucose sensor is being developed in cooperation with D.J. Harrison of the University of Alberta's chemistry department

and W.A.G. Voss, an electromagnetic systems consultant in Victoria. Their objective is to develop a miniaturized, CMOS integrated, amperometric, implantable glucose sensor. They are also examining the use of surface acoustic wave devices as active transducers for glucose determination. They maintain close contact with Siemens Medical in West Germany.

The humidity sensor group is developing a capacitive moisture sensor, integrated in CMOS technology, with an magnesium fluoride film for water absorption.

At the University of Toronto, Richard Cobbold is working primarily on chemical and acoustic sensors. Dr Cobbold is the only Canadian representative on the editorial board of the leading technical journal, The Journal of Sensors and Actuators.

Industrial Applications

In industrial processes,[39] a number of chemical parameters should be monitored to optimize the processes with respect to efficiency and quality. To make full use of microprocessor technology for efficient process control, chemical sensors could be used to make continuous on-line measurements. Very little of this is done at the moment due to the lack of sensitive, selective, stable, and durable chemical sensors.

Environmental Monitoring

Environmental monitoring[40] is another field of application for chemical sensors in general and gas sensors in particular. Long-term exposures of people to even trace amounts of hazardous gases have been shown to have severe medical implications. Health authorities need portable instruments for monitoring, and industry is interested in alarm systems for protection against elevated levels of toxic and explosive gases.

Semiconductors[41] play an important role in chemical sensor technology because of their variable conductivity. The most widely used sensors for combustible gases are based on semiconducting metal oxides. For example, when oxygen is chemisorbed on a thin film metal oxide, electrons localize at the surface. This lowers the surface conductivity. When the metal oxide is exposed to a gas that reacts with the chemisorbed oxygen, the resistivity decreases. At temperatures of a few hundred degrees Celsius, this phenomenon is rapid and reversible. Many gases react with the surface oxygen. By adding a catalytic substance, it has been possible to increase the reactivity and selectivity for specific gases. Metal oxide sensors are often suitable as gas alarms but have limitations in their use for quantitative measurements. Thin film metal oxide sensors have been developed for detecting methane in flammable vapour monitoring, carbon monoxide for hazard-combustion warning, and ethanol detectors for breathalyzers.

Semiconducting organic materials have been used for gas detection but only to a limited extent. Chemiresistors are organic semiconductors whose electrical resistance is affected by ambient gases and vapours. They have an inherently high resistivity. Phthalocyanine is an organic semiconductor that has been used to develop very sensitive and reliable nitrous oxide sensors[42] for the mining industry. Similarly, metal-substituted phthalocyanine sensors with a high sensitivity to organic and inorganic vapours have been developed. Also, organic conducting polymers[43] have been used to develop a simple and inexpensive ammonia gas sensor.

Ion-Selective Chemical Sensors

Ion-selective electrodes[44] have been used for many years in research, industrial processing, and clinical analysis for determining ion content in blood, sweat, urine, sea water, waste water, soils, clays, drinking water, foods, wines, and other substances. The most widely known is the ion-selective glass electrode used for measuring acidity. One disadvantage of these sensors is their large size. New types of

ion-selective electrodes are under development. For example, a high degree of miniaturization has been achieved with a metal wire coated with a conventional ion-selective polymer membrane[45] for acidity measurement.

Multispecies chemical microsensors[46] are under development. A prototype array of ion-selective electrodes has been produced on a silicon wafer along with the associated signal-conditioning electronics. One prototype multispecies sensor[47] has been developed that can measure acidity (pH 0.5-13.5) and chlorine, bromine, iodine, and sulphur ions (10^{-5} - 10^{-1} M, the linear concentration range) with a response time of 5 seconds. Multispecies chemical instruments and control systems are required in water quality, food processing, pharmaceutical, cell tissue culturing, agriculture, animal husbandry, and petroleum/petrochemical processing, to name a few examples.

Chemically Sensitive Field Effect Transistors (ChemFETs)

ChemFETs are chemically sensitive field effect transistors. In a ChemFET, the gate is replaced with a metallic film coated with an ion-sensitive material. This material interacts with the ions in the test solution, and this interaction affects the field at the gate and thus alters the drain current. Applications of prototype devices[48] have included monitoring solutions and reducing gases, and detecting enzymes and antibodies. ChemFET sensors[49] have been developed for oxygen, ammonia, acetic acid, carbon monoxide, arsine, and water vapour. The food industry is developing ChemFET sensors for detecting microbial activity.

Microdielectrometers

Microdielectrometers[50] monitor the dielectric constant of a medium. Integration of a FET and a microelectrode on a single chip permits small currents to be measured. This yields dielectric information over a wide frequency range. Elements with on-chip temperature sensing are being used to monitor the cure of epoxy resins and show promise for humidity sensing.

Surface Acoustic Wave Sensors

Surface acoustic wave[51] sensors have piezoelectric substrates interdigitated with arrays of electrodes serving as transmitters and receivers. When the transmitter is excited at a resonant frequency, Rayleigh waves are induced in the substrate. At the receiver, waves are converted back to electrical signals. Variations in surface characteristics (100 microns of the surface) due to absorption and condensation produce measurable frequency shifts. Surface acoustic wave based chemical sensors are used to sense parts per million of vapours such as water, sulphur dioxide, hydrogen, and organophosphorus compounds.

Chemically Sensitive Optrodes

Chemically sensitive optrodes[52] use optical fibre. A reagent is applied to the end of the optical fibre. Changes in colour or optical property indicate the presence of a substance of interest. In an optrode element for oxygen, gas diffuses through a Teflon membrane into a reagent phase where it reacts to produce chemiluminescence. Similar sensors are employed for acidity, carbon dioxide, glucose, uranium oxide, and halides. Reflectance optrodes also proved effective for sensing ammonia and oil in water.

Chemically Sensitive Ceramic Sensors

Ceramics[53] are being examined as chemically sensitive materials. Ceramics are non-metallic, inorganic materials that are processed with heat or pressure, or both. High-performance ceramics are made from raw materials whose composition is carefully controlled. Ceramic materials offer many benefits including the ability to withstand high temperatures and resist corrosion. They have special electrical properties, wear resistance, hardness, strength, and biocompatibility.

Market for Ceramic Sensors

The major growth in the market for ceramic chemical sensors is occurring in the automotive industry. The Japanese have major markets for ceramic sensors in humidity detectors for microwave ovens and video tape recorders, and combustible gas sensors to detect natural gas leaks in homes. The worldwide sales of high-performance ceramics[54] are estimated to have been $5.2 billion in 1985. The estimated overall growth rate is expected to be 16 per cent per year from 1985 to 1990. The largest growth projected for the ceramic market is expected to be in ceramic sensors with a projected growth rate of 28 per cent per year.

Biological Sensors

Biological sensors[55] are analytical systems consisting of immobilized material in contact with a suitable transducer device that will convert a biochemical signal into an electrical or optical signal. Biological molecules are able to recognize and specifically interact with a single molecule or small group of compounds. The biological materials that have been used in such sensors are enzymes, antibodies, neural receptors, whole organisms, and tissues.

To be used in a biological sensor, the biological material[56] has to be immobilized on a transducer. Techniques to accomplish this range from immobilizing the material in synthetic membranes and gel matrices to the material being adsorbed or bound chemically to a surface. The different types of transducers on which biological materials have been immobilized are electrodes, field effect transistors, optical fibres, thermistors, and piezoelectric crystals.

Care must be taken not to destroy the activity of the biological material. At present, entrapped enzymes last three to four weeks or for 50-200 assays. Most biological sensors must be used in an aqueous solution. In the future, biological sensors may be implanted to allow continuous monitoring of a patient's biochemical status. An implantable glucose[57] sensor that functions for four days has already been demonstrated.

Canadian Research with Neural Receptors

At the University of Toronto there is an active biosensor group directed by Michael Thompson and Ulrich Krull. It is an interdisciplinary group with specialists in receptor biochemistry, physics, and lipid membranes. The group is composed of two faculty members, four research assistants, seven graduate students, and a number of part-time undergraduate students.

They are working on a device that uses neural receptors embedded in a bilayer lipid membrane. In conjunction with researchers at the University of Utah, the team intends to link the membrane with an ion-selective semiconductor device. If successful with their approach to biosensors, they will have a basic understanding of how to link other neural receptors to semiconductor devices. There are hundreds of different types of neural receptors, each sensitive to a specific neural transmitter. The potential for such devices includes the detection of biologically active biochemicals and perhaps the ability to produce artificial nerve endings, which might be used to bypass physically damaged nerves. The group faces many difficulties in achieving their goal and commercial potential is not likely to occur for a number of years.

The group predicts that in five to 10 years there will be biological sensors that will have 10 000 times more sensitivity than existing electrochemical devices. This research is funded by the National Research Council, Defense Advanced Research Projects Agency, and Allied Signal (Canada).

Industrial Application

Biological sensors have been used to detect substances of environmental and industrial importance. The enzyme cholinesterase,[58] which is inhibited by pesticides and nerve gases, is used in the THORN EMI NAIAD portable nerve gas detector. This device

will detect nerve agent vapour and aerosol at concentrations as low as 0.005 milligrams per cubic metre. Biological sensors have been used to detect phenol in sewage and acids, alcohols, nitrates, and ammonia in waste waters and industrial processes.

Karube's group[59] at the Tokyo Institute of Technology have produced biological sensors that are now commercially available. They include a hypoxanthine sensor to determine fish freshness, an acetic acid sensor for food processing, and a mutagen sensor that uses whole cells (bacteria) to detect chemicals that are likely to cause cancer.

Electrode-based Sensors

Electrode-based biological[60] sensor development began over 20 years ago in the medical field to measure blood glucose. Electrode-based sensors are now available to measure cholesterol, creatinine, lactate, amino acids, triglycerides, and urea.

Biological Field Effect Transistors (FETs)

Biological FETs are made in a fashion similar to that used to make ChemFETs. The gate is replaced with a membrane containing an immobilized enzyme. An enzyme reaction changes the electric field. Biological FETs have been prototyped for measuring penicillin and ammonia.[61] Biological FETs have been proposed for early detection of corrosion in pipes and oil tanks.[62] The advantage of the enzyme FET is that the sensing area is small (typically 0.5 square millimetres). Currently, these sensors are difficult to manufacture; the techniques are labour-intensive and the failure rate is high.

Bioluminescent Sensors

Bioluminescence is a biological reaction that produces light. Attempts have been made to construct biological sensors based on light producing reactions. The enzyme luciferase[63] has been immobilized on the end of an optical fibre. This biological sensor can detect ATP (an important biological compound) at concentrations of 5×10^{-7} grams per millilitre in 4 seconds. A bioluminescent technique has been developed to detect 10 attomoles (10^{-17} moles) of TNT.[64] Another way to use bioluminescence is to bind an antibody with a fluorescent label to the substance being monitored. The fluorescence is detected with an optical fibre.

Thermistor Sensors

Thermistor biological sensors are based on the detection of heat produced during an exothermic reaction. Heat changes as small as 0.01 degrees Celsius have been demonstrated[65] for a number of analyses, such as those for blood sugar and drugs.

Piezoelectric Sensors

Piezoelectric crystal biological sensors are based on a change in mass on the surface of a quartz piezoelectric crystal. The frequency of vibration of an oscillating crystal is decreased by the adsorption of foreign material on the surface. A prototype formaldehyde sensor has been developed using this technique.[66] However, these biological sensors are also labour-intensive, expensive to produce, and have a high failure rate.

Biomedical Sensor Market

The biomedical sensor market[67] is expected to exceed $1 billion by 1990, with current real growth of 12 per cent per year.

4. CANADIAN ACTIVITY AND AWARENESS

The opportunities in emerging sensor technologies are evident. But there is little evidence that Canadians are pursuing these opportunities in earnest or planning to do so. This survey uncovered only a few world-class research groups in Canada and these had limited funding. Just a handful of graduate students are being trained in sensor technology. And industry in general exhibits a low level of awareness of the potential of the emerging technology.

Activity and Focus

To determine the extent and focus of emerging sensor technology activity in Canada the author sent out a questionnaire, undertook extensive personal interviews, and examined recent Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) grants. The questionnaire was sent to 53 members of the Canadian Advanced Technology Association, to 64 individuals who, according to a previous Science Council survey,* consider emerging sensor technologies as being potentially of great importance for Canada during the coming decade, and to 20 other individuals considered to be knowledgeable about emerging sensor technologies. Seventy-one (52 per cent) responded to the author's questionnaire. Forty-one indicated they were currently involved in the evaluation, development, or application of an emerging sensor technology (Table 5). According to these sources, the main focus of Canadian activity is on fibre optic sensor technology (Table 6).

Academic Centres and Research Grants

The 1985-1986 NSERC grant listings indicated that 20 individuals were awarded grants for research that either directly or indirectly (in the author's opinion) involved emerging sensor technology. The total of all the grants was $461 705.

According to these listings, only two academic centres (the University of Toronto and the University of Alberta) are devoting concentrated research efforts to emerging sensor technology. Two grants of $34 560 and $17 500 were awarded to individuals in the chemistry department at the University of Toronto for biological and chemical sensor investigation. Four grants of $37 248, $24 000, $18 700, and $17 280 were awarded to individuals in the electrical engineering and chemistry departments at the University of Alberta for research in membrane and chemically sensitive devices, silicon sensor technology, integrated solid-state sensors, and sensor modelling. The remaining grants (four in Quebec, nine in Ontario, and one in Manitoba) were widely dispersed and were awarded for diverse research activities ranging from three-dimensional tactile sensing in robot grippers ($14 400) to improved piezoelectric ceramics for high frequency ultrasonic transducers ($46 880). The author interviewed 20 researchers, consultants, and industry representatives, to gain insight into the extent, focus, and quality of Canadian activity in emerging sensor technology. The interviews were conducted in Toronto, Ottawa, Saskatoon, Edmonton, Vancouver, and Victoria. The interviews reveal that Canadian academic research in sensor technologies is being undertaken in many cases with close interaction with industry, but not necessarily with Canadian industry.

The Alberta Microelectronics Centre in Edmonton has an active sensor group under the direction of Henry Baltes. They are concentrating their efforts on semiconductor magnetic sensors, glucose sensors, and a humidity sensor.

At the University of Toronto, there is an active biosensor group directed by Michael Thompson and Ulrich Krull. The interdisciplinary group is working on a

* In 1984-1985, the Science Council, as part of its program on emerging science and technology, sent out a questionnaire to over 11 000 Canadian scientists and engineers. Among the more than 3600 who replied were 64 who referred to the potential of sensor technologies.

Table 5. Canadian Activity in Emerging Sensor Technology

Respondent	Yes	No	Total
Researchers	14	6	20
Industry	20	18	38
Government	4	2	6
Consultants	3	4	7
Totals	41 (58%)	30 (42%)	71

Source: author's questionnaire
Question: Are you presently involved in the evaluation, development, or application of an emerging sensor technology?

Table 6. Focus of Canadian Activity in Emerging Sensor Technology

Respondent[1]	Fo	Bio	Chem	MM	Semi	Other[2]
Researchers	4	1	3	1	2	3
Industry	14	2	2	5	2	3
Government	3	1	-	2	-	-
Consultants	1	1	1	1	-	-
Totals	22	5	6	9	4	6

Source: author's questionnaire

Notes:
1. Some respondents are evaluating, developing, or applying more than one type of sensor.
2. "Other" refers to individuals who responded about sensor activity that in the author's opinion is considered to be conventional sensor technology.

Question: If your answer is YES, which type of emerging sensor technology are you evaluating, developing or applying? (fibre optical (Fo), micromechanical (MM), biosensor (Bio), chemosensor (Chem), (Semi) semiconductor, other).

device that uses neural receptors embedded in a bilayer lipid membrane. Also at the University of Toronto is Richard Cobbold whose interest is primarily in chemical and acoustic sensors.

Until recently, J.P. Legendre in the National Research Council's electronics engineering section was investigating fibre optic sensors; this work resulted in the development of a reflectometer.

At Simon Fraser University, S.R. Morrison and R.F. Frindt in the physics department are researching semiconductor gas sensors.

Industry Awareness

Discussions with industry representatives and consultants yielded little information into the precise nature of their research in sensor technology. This was probably due to the proprietary nature of their research activities. Interviewees revealed some industry awareness of emerging sensor technologies but not as much as in the research institutes. This is not unexpected due to the emerging nature of the technology. It is reasonable to find the awareness of basic researchers to be higher than that of researchers in industry. However, both the industry representatives and consultants indicated concerns about the limited awareness in all Canadian industry sectors about emerging sensor technology.

Other Initiatives

The author's interviews revealed several other Canadian initiatives regarding sensor technologies. For instance, George Ruddle, at Energy, Mines and Resources Canada (EMR), indicated that between 1981 and 1984 the Canadian Steel Industry Research Association with assistance from EMR conducted a study of product quality sensors for the Canadian steel industry and produced four reports.

Jim Hutch, president of the Saskatchewan Research Council, indicated that the council has a study in progress to examine the feasibility of forming a centre for optical sensing technology. In particular, the study will focus on the provincial opportunities for education and research and development in fibre optic sensors.

5. DISCUSSION AND RECOMMENDATIONS

Sensor Technology -- The Promise and the Threat

New systems based on emerging sensor technologies will render previous systems obsolete. The new sensors will be cheaper, more reliable and selective, and able to perform new tasks.

The opportunity exists to conduct research leading to the design and development of new sensors and new sensing systems. The potential market is inviting. Already, the existing world market for conventional sensors is estimated at $2.2 billion. As cheaper, better, and more capable sensors become available, this market will grow fast.

At the same time, there is the opportunity to benefit from planning to equip Canadian industry and other sectors with new-generation sensing equipment. We can profit not just from selling these systems but also from using them to become more productive, more efficient, and more capable.

If we do not grasp these opportunities, we may simply fail to increase our markets or our profits. More important, we may fail to protect our competitive position.

Canada May Miss the Opportunities

The signs of growing opportunities from emerging sensor technologies are plain. Less plain are any signs that Canadians are positioning themselves to grasp these opportunities.

Where are the research groups? This study uncovered only a few excellent, internationally recognized sensor research groups in Canada. And even these seemed underfunded. Funding for each research grant holder is estimated to average approximately $23 000, hardly enough to favour the achievement of major contributions in sensor technology.

The study also found few graduate students being trained in sensor technology in Canada's educational and research facilities. If graduates are not trained now, few will be available for industry when the time comes to commercialize research findings and to incorporate emerging technology into new sensor products and processes. Canadian industry runs the risk of having to import knowledgeable people or being forced into the expensive game of "catch-up" at a later time.

Industry in general in Canada does not seem to be paying much attention to the emerging technologies -- at least, not as much attention as necessary, considering their potential impact. Without increased awareness, many industries may find themselves facing stiff competition or even displacement by companies from outside Canada that will adopt the new technology to increase efficiency and productivity.

Furthermore, significant opportunities may be lost by designers and manufacturers of process control systems and instruments if they fail to incorporate the emerging sensor technologies into new products. As C. Simon, technology manager at Shell Canada, has pointed out, "new sensors are one of the more important emerging technologies for many industries because of their potential to improve quality and productivity as well as to carry out functions that are now difficult or impossible."

If Canadians are to realize the potential of emerging sensor technologies and avoid the dangers of not doing so, then some action needs to be taken now. This study indicates that the immediate needs are:

- to hold workshops on sensor technologies;
- to monitor related international activity;
- to create an "on-line" information centre for sensor technology;
- to promote greater awareness in Canada of the potential opportunity.

The study's recommendations will be presented and discussed under these headings.

Need for Workshops

Should a national effort be mounted to provide workshops, seminars, and conferences as a basis on which industry and research institutions can increase and share their awareness of emerging sensor technology activities and developments? According to those experts who contributed to the author's survey and interviews, there is a need for such an effort (Table 7). However, most consider that workshops should not be directed toward a specific industry sector (Table 8). Depending on the anticipated attendance, it may be necessary to hold workshops on specific sensor technology, for example, a workshop on fibre optic sensors, a workshop on semiconductor and micromechanical sensors, and a workshop on biological and chemical sensors. It may be beneficial to hold a series of tandem one-day workshops to allow individuals with interest in more than one sensor technology to attend all workshops of interest. The author recommends that:

1. The Science Council, in cooperation with other agencies, should sponsor national workshops on emerging sensor technologies.

Need to Monitor International Activity

International research and development on sensor technologies is rapidly increasing in Western Europe, Japan, and the United States. Activities in these countries as well as in Canada should be continuously monitored. Information on these activities should be rapidly disseminated to Canadian researchers and industry. Furthermore, the monitoring process may result in the identification of national policies in other countries that are successfully encouraging awareness about and activity in emerging sensor technologies. The author recommends that:

2. The Department of External Affairs, through its science and technology counsellors and technology development officers based abroad, should give priority to monitoring and rapidly disseminating information on foreign developments in sensor technologies of potential importance for Canadian industry.

Need for an "On-Line" Information Centre for Sensor Technology

Canadian industry has a unique opportunity to capitalize on evolving sensor technologies precisely because of their emerging nature. Potentially large revenues may be realized by those industries and manufacturers that turn some of their efforts to incorporating new sensor technologies into cost-effective, efficient products and systems that enhance productivity and quality. There is little doubt in this author's mind that those companies and countries who develop such strategies will reap significant economic benefits that will justify their efforts well into the next century.

Finally, potential national strategic benefits may be realized from the use of these emerging sensor technologies to assist in the rejuvenation of the resource-based industries. Improved sensing systems have the potential to facilitate more efficient extraction and processing techniques. The result will be increased productivity and lower production costs that provide the opportunity for more competitive pricing strategies.

Many of Canada's sensor technology experts perceive a need for a Canadian Centre for Sensor Technology (Table 9). The general feeling is that it should not be a "mortar and brick" centre, but rather an "on-line" or "electronic" centre or institute.

The author has discussed the concept of an "on-line" institute with many of the experts interviewed for this study, and has given considerable thought to the functions and services such an institute could provide (Table 10). Respondents to the author's questionnaire also offered many comments.

Table 7. Need for Sensor Technology Workshops

Respondent	Yes	No	N/R[1]
Researchers	17	-	3
Industry	22	9	7
Government	4	-	2
Consultants	6	1	-
Totals	49 (69%)	10 (14%)	12 (17%)

Question: Would it be worth while for the Science Council of Canada to hold a workshop(s) on emerging sensor technology?

Note:
1. N/R is no response

Source: author's questionnaire

Table 8. Need for Industry Sector Workshops

Respondent	Yes	No
Researchers	6	11
Industry	8	14
Government	-	4
Consultants	3	3
Totals	17 (35%)	32 (65%)

Question: If YES, (to previous question) should the workshop(s) be directed toward a specific industry sector?

Source: author's questionnaire

Table 9. Need for a Canadian Centre for Sensor Technology

Respondent	Yes	No	N/R[1]
Researchers	12	6	2
Industry	13	19	6
Government	5	1	-
Consultants	6	1	-
Totals	36 (51%)	27 (38%)	8 (11%)

Question: Do you perceive a need for a Canadian Centre(s) for Sensor Technology?

Note:
1. N/R is no response

Source: author's survey

Table 10. Functions of a Canadian Centre for Sensor Technology

	R&D		Info		Cons		Educ	
Respondent	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Research	11	1	11	1	8	4	11	1
Industry	11	2	13	-	11	2	13	0
Government	5	-	5	-	5	-	3	2
Consultants	5	1	5	1	2	4	5	1
Totals	32	4	34	2	26	10	32	4

Question: If your answer is YES (to the previous question), what functions should the Canadian Centre(s) for Sensor Technology provide to Canadian Industry? (research and development (R&D), technical information dissemination (Info), consulting services (Cons), educational symposia (Educ)).

Using the power of microcomputers and packet-switched digital networks, an interactive institute "without walls" might effectively provide:

- access to a database of emerging and commercially available sensor technologies;
- access to a database of Canadian and international research and development activities;
- notification of conferences, seminars and expositions featuring sensor technology;
- improved communication between researchers and users;
- improved transfer of technology between developers and manufacturers;
- improved communication between those with specific sensor requirements and sensor developers;
- access to sensor application and consulting information and services.

The author recommends that:

3. The Ministry of State for Science and Technology should initiate a feasibility study to evaluate the potential for, and establish the appropriate functions of, a Canadian Centre for Sensor Technology.

Need for Greater Awareness in Canada

There is a need for greater awareness in Canada of the potential of sensor technologies. Awareness will increase if the various national professional and scientific organizations dedicate forums to the research activities in sensor technology. Increased awareness should help to stimulate more R&D, discussion, and interaction between disciplines and sectors. The author recommends that:

4. The Engineering Institute of Canada, the Chemical Institute of Canada, the Canadian Association of Physicists, and similar national science and engineering organizations should devote special sessions to sensor technology at their annual conferences.

In addition, the private sector itself must provide guidance to the academic research community and help raise the level of awareness of opportunities and threats posed by emerging sensor technologies. The author recommends that:

5. The Canadian Manufacturers' Association and the various relevant trade associations should alert their members to the potential of emerging sensor technologies and help identify where government support could be most beneficial for formation of a centre or institute and for fundamental R&D and technology diffusion programs directed toward Canadian applications of specific sensors.

NOTES

1. Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994 (Palo Alto: Market Intelligence Research Company, 1985).

2. Information from the Canadian Institute for Scientific and Technical Information at the National Research Council.

3. M. Eleccion,"Sensors Tap IC Technology to add more Functions," Electronics (June 1986): 26-30.

4. Ibid.

5. Sensors: Market Research Catalog/Spring 1986 (Palo Alto: Market Intelligence Research Company, 1986).

6. Ibid.

7. B.E. Jones, "Optical Fibre Sensors and Systems for Industry," Journal of Physics E: Scientific Instruments, 18(1985): 770-781.

8. Sensors: Market Research Catalog/Spring 1986, op. cit. note 5.

9. Ibid.

10. R.R. Diles, "High Temperature Optical Fibre Thermometer," Journal of Applied Physics, 54(1983): 1198-1201.

11. K. Wickersheim and M. Sun, "Phosphor and Fibre Optics Remove Doubt from Difficult Temperature Measurements," Research and Development (November 1985): 114.

12. H. Bigelow, "Optical Tunneling Sensor Detects ppB," Lasers & Applications (April 1986): 18.

13. D. Pinchbeck and C. Kitchen, "Optical Fibres for Cryogenic Leak Detection," Proceedings of the Conference on PROMECON, Process Measurement and Control Conference (PROMECON), Institute of Measurement and Control, London, 19-22 June 1984 (London, 1984).

14. E. Udd et al., "Fibre-optic Rotation Sensors move into the Field for Evaluation," in Digest of the 3rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 3rd International Conference on Optical Fibre Sensors, Optical Society of America, San Diego, California, 13-14 February 1985 (San Diego, 1985).

15. Ibid.

16. A. Linge et al., "Multichannel Fibre-optic Scanner," Digest of the 3rd International Conference on Optical Fibre Sensors, op. cit. note 14.

17. B.E. Jones, op. cit. note 7.

18. Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, op. cit. note 1.

19. L. Waller, "Optical-Fibre Sensors Are about to Hit the Market," Electronics (30 September 1985).

20. Narayanaswarmy, "Sensing Chemicals with Optical Fibres," Instrument and Control (March 1986): 35-36.

21. T. Farre, "The View from Japan," Lasers & Applications (January 1986): 52.

22. B.E. Jones, op. cit. note 7.

23. J. B. Angell, S.C. Terry, P.W. Barth, "Silicon Micromechanical Devices," Scientific American, 248, 4(1983): 44-55.

24. Ibid.

25. Ibid.

26. Ibid.

27. R. Brandt, "Micromechanics: The Eyes and Ears of Tomorrow's Computers," Business Week (17 March 1986): 88-89.

28. Ibid.

29. Ibid.

30. Ibid.

31. Ibid.

32. Ibid.

33. Ibid.

34. Ibid.

35. M. D. Weiss, "Chemical-sensitive Transducers: A New Breed of Miniature Sensors," InTech (June 1985): 45.

36. Ibid.

37. Ibid.

38. Ibid.

39. Ibid.

40. Ibid.

41. B.A. Bott, and T.A. Jones, "A Highly Sensitive NO_2 Sensor Based on Electrical Conductivity Changes in Phthalocyanine Films," Sensors and Actuators, 1(1984): 43-53.

42. Ibid.

43. C. Nylander, M. Armgarth, and I. Lundstrom, "An Ammonia Detector based on Conducting Polymer," Proceedings of the International Meeting on Chemical Sensors, International Meeting on Chemical Sensors, Fukuoka, Japan, 19-22 September 1983 (Amsterdam: Elsevier, 1983), 203-7.

44. H. Freiser (ed.), Ion-selective Electrodes in Analytical Chemistry (New York: Plenum Press, 1980): 85-105.

45. Ibid.

46. G. Fisher, "Ceramic Sensors: Providing Control through Chemical Reactions," Ceramics Bulletin, 65(1986): 622-629.

47. J.E. Brignell, "The Sensor Revolution," Physics Bulletin, 36(1985).

48. Ibid.

49. Ibid.

50. Ibid.

51. Ibid.

52 Ibid.

53. P.S. Sen, "Future Looks Bright for High-performance Ceramics," Research and Development (July 1986): 67-68.

54. Ibid.

55. V. Owen,"Biosensors," Sensor Review (January 1985): 20-24.

56. Ibid.

57. M. Shichiri et al., "Wearable Artificial Endocrine Pancreas with Needle-type Glucose Sensor," The Lancet (November 1982): 1129-1131.

58. V. Owen, op. cit. note 55.

59. S. Yanchinski, "Biochips Speed up Biochemical Analysis," New Scientist (28 January 1982): 236.

60. V. Owen, op. cit. note 55.

61. Ibid.

62. Yanchinski, op. cit. note 60.

63. T.M. Freman, W.B. Seitz, "Chemiluminescence Fibre Optic Probe for Hydrogen Peroxide Based on Luminol Reaction," Analytical Chemistry, H150(1978): 1242-1246.

64. J. Wannlund and M. DecLuca, "A Sensitive Bioluminescent Immunoassay for Dinitrophenol and Trinitrotoluene," Analytical Chemistry, HI122(1982): 385-393.

65. K. Mosbach, C.F. Mandenius, B. Danielsson, "New Biosensor Devices," Biotech 83. Proceedings of the International Conference on Applied Biotechnology, Biotech 83: International Conference and Exhibition on the Commercial Exploitation of Biotechnology, Online Conferences Ltd., London, 4-6 May 1983 (London, 1983), 665-678.

66. G.G. Guibault, "Determination of Formaldehyde with an Enzyme Coated Piezoelectrical Crystal Detector," Analytical Chemistry, 55(1983): 1682-1684.

67. Sensors: Market Research Catalog/Spring 1986, op. cit. note 5.

APPENDICES

APPENDIX A. CONFERENCES AND ORGANIZATIONS RELATED TO SENSOR TECHNOLOGY

The following conferences are or were partly or totally dedicated to emerging sensor technologies:

Transducers '87, Institute of Electrical Engineers of Japan, Foundation for the Advancement of International Science, Tokyo, 2-5 June 1987.

4th International Conference on Optical Fibre Sensors, Optical Society of America, Tokyo, 7-9 October 1986.

Fibre '86, Fibre Optics, Optoelectronics and Laser Applications in Science and Engineering, International Society for Optical Engineering, Cambridge, Massachusetts, 21-26 September 1986.

Sensors Expo, North American Technologies, Chicago, 17-19 September 1986.

Applying Sensors in Robot Applications, Society of Manufacturing Engineering, (city unknown), 10-11 September 1986.

SPIE's 30th Annual International Technical Symposium on Optical and Optoelectronic Engineering, SPIE (International Society of Optical Engineering) San Diego, California, 17-22 August 1986.

Current and Future Technology in Agricultural Sensors and Applications, American Society of Agricultural Engineers, San Luis Obispo, California, 29 June-2 July 1986.

WESCON '85, Integrated Sensor Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers, San Francisco, 19-22 November 1985.

RoViSeC 5, 5th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, Royal Institution of Engineers in the Netherlands, Dutch Society of Informatics, Society for Production Engineering, Amsterdam, 29-31 October 1985.

Sensors and their Applications, Institute of Physics, Southampton, U.K., 10-12 September 1985.

Transducers '85, (sponsor unknown), Philadelphia, 11-14 June 1985.

Sensor '85, Society of Manufacturing Engineering, Karlsruhe, West Germany, 21-23 May 1985.

Symposium on Biosensors, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, National Science Foundation, Los Angeles, 15-17 September 1984.

Transducers '83, (sponsor unknown), Delft, The Netherlands, 31 May-8 June 1983.

ORGANIZATIONS

Several organizations have also been established in recent years to assist in the research and development or transfer of sensor technology to industry:

Optical Sensors Collaborative Association (U.K.), Chemical Sensing Group
The objectives of the group are to help chemical sensing technology using electro-optic and fibre optic techniques.

Contact: Mrs P. West, OSCA Manager, Sira Ltd., South Hill, Chiselhurst, Kent BR7 5EH, U.K.

Optical Sensor Research Unit
Nine major British companies have joined the University of Manchester Institute for Science and Technology and the Department of Trade and Industry to form the Optical Sensor Research Unit. They have formed an Industry-University Centre for the Study of Integrated Sensors. The unit will conduct research into chemically sensitive fibre optic devices.

Contact: Optical Sensor Research Unit, Department of Instrumentation and Analytical Science, University of Manchester Institute for Science and Technology, P.O. Box 88, Manchester M60 1QD, U.K.

Center for Sensor Technology
The University of Utah has formed a Center for Sensor Technology. The objective is to consolidate the basic R&D for and production of sensor systems as early in their development as possible. This will be achieved by integrating solid-state electronics, chemistry, physics, and biology, and investigating and applying the physiological and biochemical principles of sensing.

Contact: Mr Jiri Janata, Director, Center for Sensor Technology, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112, U.S.A.

Sensors and Instruments Division, GEC
Marconi Research Centre within GEC Research has a Sensor and Instruments Division. Its primary job is to conduct research and introduce sensors and sensing techniques into the numerous manufacturing companies within GEC. The division also does contract R&D into sensors for other companies.

Contact: Mr G.J. Jordan, Manager, Sensors and Engineering Systems Laboratory, Marconi Research Centre, West Hanningfield Road, Great Baddow, Chelmsford, Essex CM2 8HN, U.K.

Fraunhofer Institute for Physical Measurement Technology
The Fraunhofer Institute has developed optic and electronic sensors for product and process control. Their sensors sense temperature, force, distance, humidity, pressure, chemical composition, and flow rate. The Institute earns 70-80 per cent of budget from contract work.

Contact: Dr Rainer Kist, Fraunhofer-Institut fur Physikalische MeBtechnik, Heidenhofstrabe8, D-7800 Freiburg, FRG

Battelle Institut
The Battelle Institut has two European locations: Frankfurt, West Germany and Geneva, Switzerland. The Frankfurt sensor group solves automation problems with the help of intelligent sensors and microelectronics, develops new sensors, investigates and consults in the sensor field, and is establishing a database. The Geneva group's activities are similar to those of the Frankfurt group but in addition it has expertise in biomedical and fibre optic sensors.

Tokyo Institute of Technology
The Tokyo Institute of Technology does R&D on biological sensors. The Institute is funded primarily by the ministries of Education, International Trade and Industry and Agriculture. A number of its sensors are commercially available. Recently it has developed a light-activated biochip switching device from bacterial protein.

Cambridge Consultants Ltd.
Cambridge Consultants Ltd. is a subsidiary of Arthur D. Little. The biophysics group is concentrating on fibre optic sensor development for the instrumentation side of biotechnology. Particular applications of interest are sensors for effluent management, monitoring biodeterioration, and detecting explosives for the military.

Center for Sensor Technology
This centre is within the School of Engineering and Applied Science at the University of Pennsylvania.

Contact: Jay N. Zemel, RCA Professor of Solid State Electronics and Director, Center for Sensor Technologies, School of Engineering and Applied Science, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104-6390, U.S.A.

STUDIES

Several studies have also been completed on sensor technologies in the past two or three years:

Sensor Database
The Fachinformationszentrum Technik asked the Battelle Institut in Frankfurt to build a sensor product database for mechanical engineering. Individual sensors are characterized according to a uniform system of categories. The database became operational in 1985.

Contact: Ms Renate Siebrasse, Battelle Institut Ltd., 15 Hanover Square, London W1R 9AJ, U.K.

Worldwide Fibre Optic Sensor Study
ERA Technology of Leatherhead, Surrey in the U.K. has completed a study of worldwide activity in fibre optic sensors. It researched more than 400 technical papers and patents. The study is sold in three volumes: I. Markets (introduces the technology and currently available sensors, describes worldwide R&D activities, compares competitive semiconductor and ceramic technologies); II. Technology (compares common factors found in research papers); and III. Bibliography.

Contact: Mr Peter Baker (marketing), Dr Andrew MacGregor (technology), ERA Technology Ltd., Cleeve Road, Leatherhead, Surrey KT22 7SA, U.K.

A Study of Japanese Developments in Sensors
The Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) is completing a two-year study to identify Japanese sensor companies with commercial sensor products and new technology developments. The Institute, based in Chicago, says sensors already in use in Japan could boost technological developments in many industrial sectors. Despite a great demand for low-cost, reliable sensor products, sensor technology has lagged behind processor technology. Implementation of the new developments for industrial process and management control, data processing, office equipment, and medical devices awaits advanced sensor technology. IITRI's preliminary research indicates that Japan has successfully adapted and applied worldwide technology to produce excellent sensors for their domestic markets. Currently about 400 companies in Japan are producing sensor-based products. Most of these are small companies. Subscribing clients of IITRI pay $9000 per year to receive quarterly reports that include information on five sensor categories: temperature and heat; electromagnetic, wave and radiation; mechanical; and chemical; and biochemical. IITRI is collaborating with Yanase and Associates Inc., an inter-disciplinary techno-economics research firm in Tokyo.

Contact: Bob Levi, Technology Assessment and Business Analysis Group, IIT Research Institute, 10 West 35th Street, Chicago, IL 60616, U.S.A.

Sensor Market Studies
Market Intelligence Research Company has produced a number of sensor market reports, which range in price from U.S.$195 to U.S.$1690. Topics covered include machine vision markets, industrial transducer markets, fibre optic sensor markets, a biomedical sensor and electrode market analysis, the infrared thermometer sensor market, fibre optic sensors in the medical market, and humidity instrumentation markets.

Contact: Market Intelligence Research Company, 4000 Middlefield Road, Palo Alto, CA 94303, U.S.A.

APPENDIX B. INDIVIDUALS INTERVIEWED

Henry Baltes
Director
Alberta Microelectronics Centre
Edmonton, Alberta

Alex Curran
President
SED Systems Inc.
Saskatoon, Saskatchewan

John Dewey
Deputy Minister
Ministry Post-Secondary Education
Victoria, British Columbia

Denzil Doyle
President
DoyleTech Corporation
Ottawa, Ontario

Ron Freedman
Consultant
Toronto, Ontario

R.F. Frindt
Professor
Simon Fraser University
Vancouver, British Columbia

Larry Gelmon
Senior Program Officer
International Development
Research Centre
Ottawa, Ontario

Vida Ghaemmaghami
Department of Chemistry
University of Toronto
Toronto, Ontario

Keith Harman
President
SenStar Corporation
Kanata, Ontario

Jim Hutch
President
Saskatchewan Research Council
Saskatoon, Saskatchewan

Trevor Jubb
Deputy Director General
Canadian Centre for Mineral
and Energy Technology
Energy, Mines and Resources
Ottawa, Ontario

K. Kallury
Department of Chemistry
University of Toronto
Toronto, Ontario

J.P. Legendre
Electronics Engineering Section
National Research Council
Ottawa, Ontario

Pierre Lemoyne
Product Manager
Guildline Instruments Inc.
Smith Falls, Ontario

R.W. Olmstead
President
Conservation Energy Systems
Saskatoon, Saskatchewan

N. Ramanathan
Senior Physicist
Picker International Canada Inc.
Bramalea, Ontario

George E. Ruddle
Metal Forming Section
Energy, Mines and Resources
Ottawa, Ontario

Saul Silverman
President
Silverman Consulting Services
Ottawa, Ontario

A. Strifler
President
Anatel Optronics Inc
Burlington, Ontario

Joseph Tedesco
Department of Chemistry
University of Toronto
Toronto, Ontario

The Science Council of Canada is Canada's national advisory agency on science and technology policy. Its primary responsibilities are to

- analyse science and technology policy issues;
- recommend policy directions to government;
- alert Canadians to the impact of science and technology on their lives;
- stimulate discussion of science and technology policy among governments, industry and academic institutions.

Conseil des sciences du Canada
Science Council of Canada

Document d'étude

La technologie émergente des capteurs: ses enjeux

Sylvan Katz

La technologie émergente des capteurs : ses enjeux

Septembre 1987

Les documents d'étude sont des documents de travail que le Conseil des sciences du Canada met à la disposition des personnes ou groupes intéressés, en quantité limitée, pour connaître leurs points de vue.

Le Conseil des sciences du Canada ne souscrit pas nécessairement aux opinions exprimées par l'auteur du présent document.

Pour obtenir gratuitement un exemplaire de

LA TECHNOLOGIE EMERGENTE DES CAPTEURS : SES ENJEUX

Prière de s'adresser au :

Service des publications
Conseil des sciences du Canada
100, rue Metcalfe
Ottawa (Ontario) K1P 5M1

This paper is also available in English at the above address.

© Ministre des Approvisionnements et Services, 1987

N° de catalogue : SS21-5/1987-5F
ISBN 0-662-94396-1

TABLE DES MATIERES

Résumé à l'intention de la direction 5

Avant-propos 7

Remerciements 9

1. Introduction 11
Perpectives de développement des technologies émergentes des capteurs au Canada 11
But du présent document 11

2. Systèmes à base de capteurs 13
Description des systèmes 13
Ventes de capteurs dans le monde 13

3. Les technologies émergentes des capteurs et leurs marchés 17
Croissance relative des technologies des capteurs 17
Capteurs à semi-conducteur 18
Capteurs à fibre optique 19
Capteurs micromécaniques 23
Capteurs chimiques 25
Capteurs biologiques 28

4. Activités et intérêt manifesté au Canada 31
Activités et orientation 31
Centres universitaires et subventions de recherche 31
Intérêt manifesté par l'industrie 33
Autres projets 33

5. Discussion et recommandations 34
La technologie des capteurs : perspectives et risques possibles 34
Le Canada risque de manquer le bateau 34
Tenue d'ateliers 35
Activités menées à l'échelle internationale 35
Centre pour l'accès "en direct" aux informations sur les technologies des capteurs 35
Promotion des technologies des capteurs au Canada 37

Notes 40

Annexes
A. Conférences sur les technologies des capteurs et organisations intéressées 45
B. Personnes interviewées 49

Liste des tableaux
Tableau 1. Ventes mondiales de capteurs en 1984 15
Tableau 2. Utilisateurs de capteurs en 1984 15
Tableau 3. Technologies émergentes des capteurs : croissance relative, selon la fréquence des mots clés 17
Tableau 4. Marchés mondiaux des capteurs à fibre optique 23
Tableau 5. Activités portant sur les technologies émergentes des capteurs au Canada 32
Tableau 6. Orientation des activités de recherche sur les technologies émergentes des capteurs au Canada 32
Tableau 7. Besoin d'ateliers sur les technologies des capteurs 36
Tableau 8. Besoin d'ateliers axés sur le secteur industriel 36
Tableau 9. Besoin d'un Centre canadien de la technologie des capteurs 38
Tableau 10. Fonctions d'un Centre canadien de la technologie des capteurs 38

Figure
Figure 1. Système à base de capteur 14

Les industries et les chercheurs du Canada doivent prendre conscience des perspectives de développement des technologies émergentes des capteurs et des conséquences qui pourraient découler d'un manque d'intérêt pour ces technologies.

L'importance technique des capteurs
Les systèmes de contrôle des procédés et de mesure font partie intégrante de toutes les activités industrielles et de recherche. Ces "systèmes de détection" sont composés de quatre parties essentielles : un ou plusieurs capteurs, un processeur, une unité périphérique de sortie et des liaisons de communication. Au cours de la dernière décennie, les processeurs, les unités périphériques de sortie et les liaisons de communication ont fait l'objet d'importants progrès technologiques. Jusqu'à récemment, les technologies des capteurs marquaient un certain retard par rapport aux trois autres composantes.

En effet, des progrès rapides ont récemment été réalisés sur la scène internationale dans le domaine des technologies des capteurs. A la fin des années 1970, nous avons assisté à un regain des activités de recherche dans les domaines des capteurs à semi-conducteur ou à fibre optique et des capteurs micromécaniques, biologiques et chimiques. Les progrès récents réalisés dans les sciences des semi-conducteurs ont servi de fondement technologique pour chacune des technologies émergentes des capteurs.

Ces technologies émergentes des capteurs revêtiront une grande importance pour beaucoup d'industries. Elles pourront en effet procurer à chaque secteur industriel des systèmes de détection plus sensibles, plus sélectifs, plus efficaces et plus résistants. Elles favoriseront une hausse de la productivité et de la rentabilité en améliorant l'efficacité de la transformation des matières premières et de la fabrication des produits finis. En outre, elles stimuleront l'élaboration d'une nouvelle génération d'instruments et de produits de consommation.

Perspectives pour la R-D et la production
Les capteurs font l'objet d'une importante demande sur les marchés mondiaux. En 1984, les ventes mondiales de capteurs classiques étaient évaluées à 2,2 milliards de dollars. Les secteurs de la machinerie et de la fabrication (528 millions de dollars) et du contrôle des procédés (667 millions de dollars) étaient les principaux utilisateurs de ces dispositifs. Même si peu des technologies émergentes des capteurs ont jusqu'à maintenant été commercialisées, les ventes et les prévisions préliminaires portent à croire qu'elles pourraient bientôt percer une part sensible des marchés des capteurs.

Le nombre croissant de conférences et d'études importantes portant sur les capteurs et la création d'instituts et d'associations intéressés à ce domaine traduisent bien l'importance accordée, sur la scène internationale, aux technologies des capteurs. L'industrie, les gouvernements et les universités au Japon, aux Etats-Unis, en Grande-Bretagne, en Allemagne de l'Ouest et en Suisse collaborent à la mise sur pied de groupes, d'associations et de centres. Un des principaux objectifs de ces efforts est de regrouper les chercheurs intéressés aux capteurs et oeuvrant dans plusieurs disciplines différentes.

Aide requise pour accroître la participation canadienne
L'industrie canadienne ne semble pas être pleinement consciente de ces technologies émergentes des capteurs. C'est du moins ce que laissent penser les résultats d'enquêtes menées auprès des chercheurs, des industriels et des experts-conseils au moyen de questionnaires et d'entrevues.

Les recherches menées au Canada sur les technologies des capteurs sont limitées et notre pays ne compte que deux groupes universitaires de recherche de calibre international : le premier à l'Université de Toronto (capteurs biologiques), et l'autre à Edmonton, au Alberta Microelectronics Centre (capteurs à semi-conducteur et capteurs

biologiques). Les autres chercheurs intéressés à ce domaine travaillent isolément, un peu partout au pays.

L'industrie canadienne doit prendre davantage conscience des possibilités que présentent les technologies émergentes des capteurs et déterminer les meilleurs moyens de stimuler les travaux fondamentaux de R-D axés sur les applications particulières des capteurs.

Les résultats d'un questionnaire font ressortir le besoin de tenir des ateliers sur les technologies émergentes des capteurs et de mettre sur pied un institut ou un centre spécialisé dans ce domaine. A ce propos, de nombreux spécialistes ont dit préférer la mise sur pied d'un centre électronique interactif à une concentration des compétences en un seul et même lieu physique.

En conséquence, l'auteur recommande :

- Que le ministère des Affaires extérieures, par le biais de ses conseillers en sciences et en technologie et de ses agents de développement technologique en poste à l'étranger, accorde la priorité à la surveillance et à la diffusion rapide des informations sur les progrès réalisés à l'étranger dans le domaine des technologies des capteurs qui pourraient être importants pour l'industrie canadienne.

- Que le Conseil des sciences, en collaboration avec d'autres organismes, parraine des ateliers nationaux sur les technologies émergentes des capteurs.

- Que le ministère d'Etat chargé des Sciences et de la Technologie entreprenne une étude de faisabilité visant à évaluer l'opportunité de mettre sur pied un Centre canadien de la technologie des capteurs et à en déterminer les fonctions.

- Que l'Institut canadien des ingénieurs, l'Institut de chimie du Canada, l'Association canadienne des physiciens et d'autres organisations nationales semblables de sciences et de génie consacrent des sessions spéciales à la technologie des capteurs à l'occasion de leurs conférences annuelles.

- Que l'Association des manufacturiers canadiens et les diverses autres associations professionnelles pertinentes informent leurs membres des possibilités que présentent les technologies émergentes des capteurs et qu'elles contribuent à déterminer les secteurs où l'aide gouvernementale pourrait le mieux contribuer à la mise sur pied d'un centre ou d'un institut et à l'élaboration de programmes de diffusion des résultats des travaux fondamentaux de R-D et de la technologie axés sur des applications particulières des capteurs au Canada.

Beaucoup de Canadiens comptent aujourd'hui sur les nouvelles technologies pour moderniser les industries traditionnelles, en créer de nouvelles et diversifier notre infrastructure économique nationale. Le Programme des sciences et technologies émergentes (STE) a été mis sur pied afin de participer à ces efforts en facilitant l'identification précoce des progrès en sciences et en technologies qui pourraient s'avérer critiques pour l'évolution de l'économie canadienne, en déterminant les obstacles dont il faudra tenir compte et en favorisant l'établissement d'un consensus sur les actions requises pour tirer avantage des possibilités offertes par les nouvelles technologies. Le Programme STE est essentiellement un processus de consultation.

Les documents d'étude publiés précédemment portaient sur :

- les délibérations d'une série de trois ateliers sur les matériaux industriels de pointe et les résultats d'une enquête menée auprès des participants à ces ateliers;
- les résultats d'une enquête menée auprès d'experts du Canada et de l'étranger et les délibérations d'un atelier sur les technologies émergentes des plastiques;
- les résultats d'une enquête nationale comportant trois phases : une série d'entrevues téléphoniques menées auprès de 200 sommités du monde des sciences et des technologies canadiennes issus de l'industrie, du gouvernement et des universités; une enquête postale subséquente menée auprès de gestionnaires de la recherche du Canada; une enquête postale menée auprès de 3 500 chercheurs, administrateurs de recherche et autres personnes spécialisées en sciences et en technologies. Ces consultations avaient pour but de déterminer quelles étaient, selon ces experts, les technologies émergentes présentant une importance stratégique pour notre pays et de déterminer les points forts du Canada.

Les technologies des capteurs comptaient parmi celles mentionnées par beaucoup des experts interrogés au cours de cette consultation nationale. Ces technologies progressent à grands pas afin de répondre à une demande croissante dans une grande variété de secteurs industriels. Par exemple, la société Forintek Canada a récemment fait breveter un capteur qui permet de déterminer rapidement et exactement l'humidité du bois dans une scierie et de transmettre ces données à un ordinateur qui contrôle le tri du bois avant son séchage au four. Dans le domaine de l'avionique, la société Canadian Marconi travaille à la mise au point d'un capteur qui aidera les pilotes à éviter que leur avion ne soit frappé par la foudre. Les travaux de cette Société se fondent sur une technologie intégrée de l'optique mise au point par le Conseil national de recherches.

Le présent document d'étude a été commandé dans le cadre du Programme STE du Conseil des sciences. Il a pour principal objectif de renseigner les Canadiens sur les diverses technologies émergentes des capteurs et sur la nature des progrès réalisés actuellement dans ce domaine au pays et à l'étranger. Nous y recommandons également certaines politiques et certaines mesures qui pourraient contribuer à aider les Canadiens à tirer profit des possibilités offertes et à éviter les dangers que pourrait présenter un manque d'intérêt à ces technologies émergentes. Ce document est publié afin de permettre à l'auteur de partager ses opinions et les résultats de ses recherches avec le plus grand nombre possible de personnes intéressées. Il devrait s'avérer utile puisqu'il fait le tour de la question d'une façon suffisamment détaillée tout en demeurant compréhensible pour des non-spécialistes. Il fournit des renseignements utiles sur les technologies, leur importance, les lacunes du Canada dans ce domaine et le manque d'intérêt manifesté par l'industrie. Il devrait également servir de source préliminaire d'information aux chercheurs et aux organismes bailleurs de fonds.

Le présent rapport a été rédigé par M. Sylvan Katz, un consultant ayant une formation en biologie moléculaire et en informatique. M. Katz a récemment terminé

une affectation de deux ans à titre d'adjoint exécutif à la société SCI-TEC Instruments Inc., un fabricant d'instruments de Saskatoon.

Le directeur adjoint de la recherche
Conseil des sciences du Canada

Guy P.F. Steed

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à souligner l'aide financière fournie par le ministère d'Etat chargé des Sciences et de la Technologie pour la préparation du présent document d'étude. Il tient également à remercier les chercheurs, les industriels et les experts-conseils interviewés pour l'énergie qu'ils ont consacrée et l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce projet. Il remercie également son père, le Dr Leon Katz, pour ses commentaires et pour les nombreuses heures de discussion qu'il lui a accordées.

L'auteur est également redevable à Maureen Morton et Lee-Yong Tan, de l'Institut canadien de l'information scientifique et technique, pour leur participation à la collecte des données de base. Il remercie finalement le Conseil des sciences du Canada sans l'aide duquel le présent rapport et les renseignements qu'il contient n'auraient pu être publiés.

1. INTRODUCTION

Perspectives de développement des technologies émergentes des capteurs au Canada

Les capteurs ont pour rôle de détecter les conditions physiques et chimiques et de transmettre cette information à l'utilisateur ou à un autre système ou dispositif. Ces systèmes sont utilisés dans les secteurs industriels et d'autres secteurs pour le traitement des données, le contrôle des procédés et l'instrumentation.

La technologie présidant à la conception et à la production des systèmes de captage est parvenue à un niveau raisonnable de maturité, sauf en ce qui concerne les capteurs en soi. Dans ce dernier domaine, les progrès technologiques actuels permettront la création d'une nouvelle génération de capteurs à la fois moins coûteux, plus fiables, plus efficaces et capables de mener à bien une grande variété de nouvelles tâches.

L'émergence de ces nouveaux capteurs révolutionnera le marché des systèmes de détection. Déjà, les marchés mondiaux pour les capteurs classiques sont évalués à 2,2 milliards de dollars. A mesure que les nouveaux capteurs sont mis au point et commercialisés, ce volume augmentera rapidement. Les Canadiens sont en mesure de participer à cette croissance, d'une part, en mettant au point et en commercialisant de nouveaux capteurs et de nouveaux systèmes de détection et d'autre part, en utilisant ces nouveaux systèmes pour accroître la productivité de leurs entreprises.

Il est important que nous participions à cette croissance. A l'avenir, nous devrons soutenir la concurrence des fabricants offrant une nouvelle génération de systèmes de détection et celle des entreprises qui utilisent ces nouveaux systèmes pour accroître leur productivité et leur rentabilité. Notre aptitude à relever ce double défi sera amoindrie si nous ne commençons pas immédiatement à étudier les technologies émergentes des capteurs et à planifier leurs utilisations futures.

But du présent document

L'auteur a entrepris une enquête afin de recueillir des renseignements sur les travaux menés actuellement au Canada et à l'étranger dans le domaine des technologies émergentes des capteurs. Il a également cherché à connaître l'opinion des scientifiques et des industriels canadiens sur le type d'aide qui pourrait s'avérer utile, au moyen de questionnaires et d'entrevues personnelles. Le présent document a été préparé afin de faire connaître aux personnes intéressées les résultats de cette enquête.

Le présent document a pour but de faire part aux industriels et aux chercheurs canadiens des progrès récents réalisés dans le domaine des technologies émergentes des capteurs, de faire un bref tour d'horizon des activités de recherche, de développement et de commercialisation en cours au Canada et dans le monde, et de recommander des politiques et des mesures propres à aider les Canadiens à profiter des possibilités offertes par ces technologies émergentes et à éviter les dangers que pourrait présenter un manque d'intérêt dans ce domaine.

Nous mettrons l'accent uniquement sur les technologies émergentes des capteurs et non sur les systèmes de détection. Il est clair que la majorité des revenus économiques attendus proviendront de la vente des systèmes de détection et non seulement des capteurs, mais si nous tenons à tirer profit de l'élaboration et de l'utilisation de ces nouveaux systèmes complexes de détection, nous devrons faire porter nos efforts sur l'établissement de réseaux entre les diverses communautés de la recherche et de l'industrie ainsi qu'à l'intérieur de chacune d'elles, et insister sur une prise de conscience de l'importance des technologies émergentes des capteurs.

La recherche et le développement dans ce domaine sont d'autant plus difficiles qu'il faut habituellement des efforts interdisciplinaires importants pour combiner les informations provenant de la physique, de la

chimie et de la biologie afin de produire des capteurs capables de mesurer exactement et sélectivement d'infimes changements dans les paramètres physiques, chimiques et biologiques.

2. SYSTEMES A BASE DE CAPTEURS

Description des systèmes

Les systèmes à base de capteurs détectent les conditions physiques ou chimiques pertinentes et transmettent ces informations, sous une forme appropriée, à l'utilisateur ou à un autre système ou dispositif. Ces systèmes comportent quatre parties principales : les capteurs, les processeurs, l'unité périphérique de sortie et les liaisons de communication (voir figure 1).

Un capteur est une unité périphérique d'entrée qui transforme un paramètre physique ou chimique en un signal électrique ou optique. Au nombre des paramètres physiques communément contrôlés par les capteurs, mentionnons la température, la pression, la force, le champ magnétique et le mouvement. Par ailleurs, les paramètres chimiques que l'on cherche le plus souvent à déterminer sont la présence ou la concentration de substances chimiques ou biologiques.

Un processeur transforme les informations transmises par le capteur sous une forme propice à la sortie. Au cours des dernières années, la technologie des processeurs et, en particulier celle des microprocesseurs, a progressé très rapidement. Ces progrès se poursuivent actuellement avec la miniaturisation, l'augmentation de la vitesse et de la longueur des mots, la simplification des logiciels et l'accélération de la production.

Une unité périphérique de sortie transmet l'information ainsi transformée à l'utilisateur, à un dispositif d'actionnement ou à un autre système. La nature et la qualité des unités périphériques de sortie ont connu des améliorations au cours de la dernière décennie, période au cours de laquelle nous avons assisté à la mise au point des dispositifs d'affichage à cristal liquide, à plasma et à électroluminescence. Par ailleurs, les progrès réalisés dans le domaine des matériaux de pointe ont permis de créer des dispositifs d'actionnement peu coûteux et plus résistants.

Une liaison de communication permet la transmission du signal électrique ou optique du capteur au processeur ou du processeur à l'unité périphérique de sortie. Généralement, cette liaison est assurée par fil, fibre optique ou liaison électromagnétique (par exemple, ondes radio transmises par satellite). Les liaisons de communication sont toujours en pleine évolution. Par exemple, le perfectionnement des matériaux et des méthodes de fabrication ont mené à la mise au point d'une fibre optique monomode qui minimise l'affaiblissement du signal.

Ces quatre composantes sont nécessaires à la construction des systèmes de détection. Pourtant, c'est le capteur qui distingue ces systèmes l'un de l'autre. La technologie des capteurs constitue le fondement même de tous les systèmes de traitement de l'information, les systèmes de contrôle des procédés et les instruments de toutes sortes. Après tout, un processeur sans capteur n'aurait pas de données à traiter. Par ailleurs, un procédé ne peut être contrôlé sans l'aide d'un capteur qui permet d'en suivre le déroulement. En fait, un instrument sans capteur n'est pas un véritable instrument.

Ventes de capteurs dans le monde

Maintenant que les progrès technologiques ont permis d'abaisser le coût des microprocesseurs et des convertisseurs analogiques-numériques, le coût des capteurs est devenu un élément important du coût total du système de détection. Ainsi, les pressions économiques exercées pour abaisser le coût des capteurs sont devenues considérables. Par ailleurs, la plupart des entreprises recherchent des capteurs qui sont non seulement moins coûteux mais également plus précis, plus fiables, plus sélectifs et plus résistants pour le contrôle des procédés et les mesures.

En Occident, les ventes de tous les types de capteurs ont été évaluées à 2,2 milliards de dollars[1]. Les principaux fournisseurs (tableau 1) sont les Etats-Unis, l'Europe de l'Ouest et le Japon. Les principaux utilisateurs (tableau 2) de ces capteurs sont le secteur du contrôle des procédés (34 %) et le secteur de la machinerie et de la fabrication (24 %).

Figure 1. Système à base de capteur

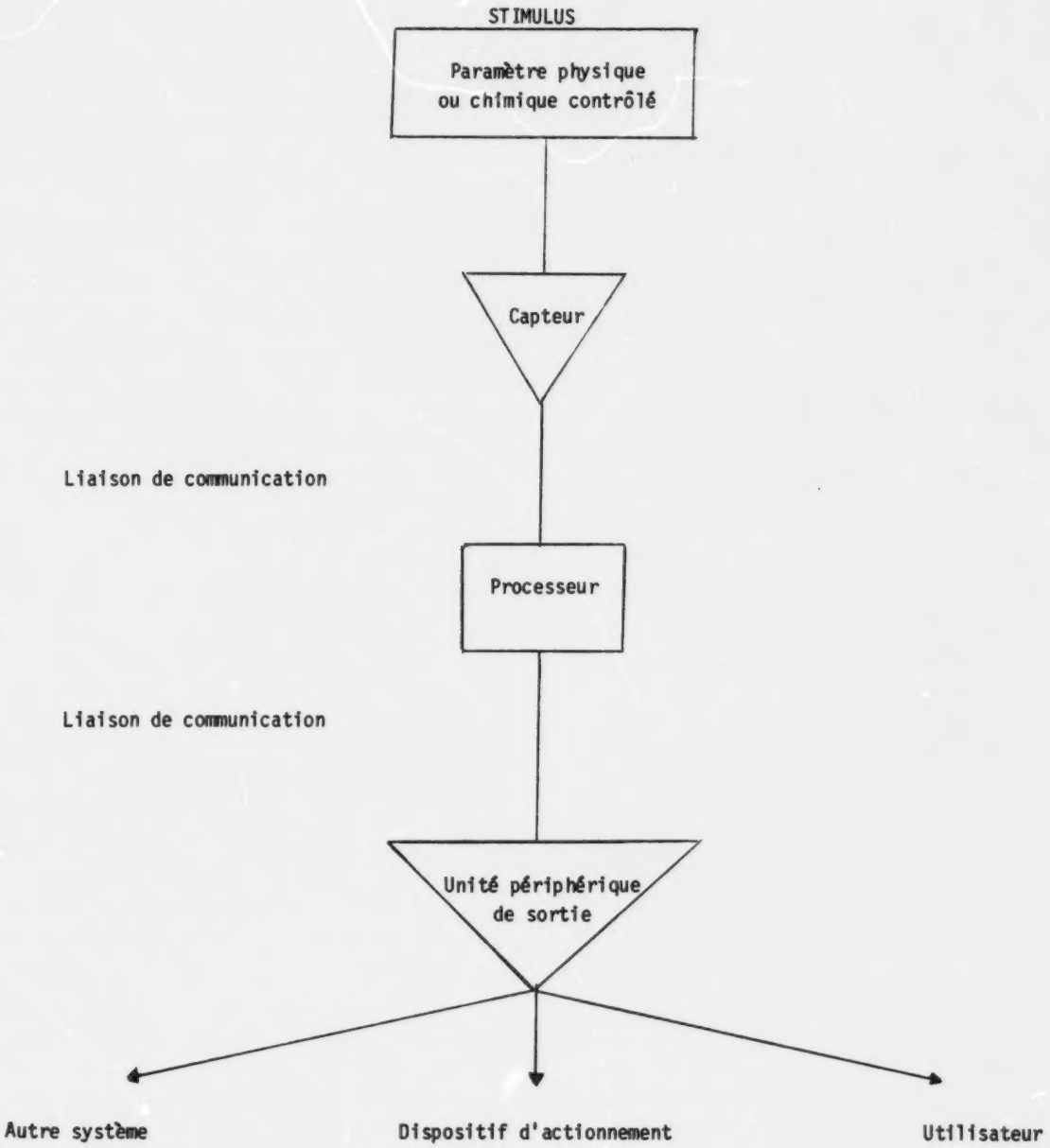

Tableau 1. Ventes mondiales de capteurs en 1984

Fournisseur	Valeur (millions de $ U.S.)	Pourcentage du total
Etats-Unis	1016 $	46
Europe de l'Ouest	788	35
Japon	425	19
Autres	faible	0
Total	2229 $	100 %

Source : Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, Market Intelligence Research Company, Palo Alto, Calif.

Tableau 2. Utilisateurs de capteurs en 1984

Catégorie	Valeur (millions de $ U.S.)	Pourcentage du total
Industrie aérospatiale et défense	347 $	16
Consommation et automobile	214	10
Energie et environnement	242	11
Machinerie et fabrication	528	24
Sciences et médecine	231	10
Contrôle des procédés	667	30
Total	2229 $	100 %

Source : Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, Market Intelligence Research Company, Palo Alto, Calif.

Les technologies émergentes des capteurs commencent à peine à faire une percée dans ces marchés bien établis. A mesure que ces nouvelles technologies parviendront à maturité, elles permettront de produire des capteurs moins coûteux mais dont la précision, la fiabilité et la sélectivité seront supérieures. Ces nouveaux capteurs remplaceront beaucoup des dispositifs actuellement sur le marché.

3. LES TECHNOLOGIES EMERGENTES DES CAPTEURS ET LEURS MARCHES

Croissance relative des technologies des capteurs

Depuis quelques années, les recherches portant sur la technologie des capteurs progressent à grands pas dans cinq domaines :

- capteurs à semi-conducteur;
- capteurs à fibre optique;
- capteurs micromécaniques;
- capteurs chimiques;
- capteurs biologiques.

Cette croissance est confirmée par le nombre toujours plus grand d'articles de recherche publiés sur ces sujets. Nous avons procédé à une recherche dans les banques de données INSPEC et COMPENDEX afin de déterminer la fréquence des mots clés suivants :[2] "fibre optic sensor" (capteur à fibre optique), "biological sensor" (capteur biologique), "chemical sensor" (capteur chimique) et "micromechanical sensor" (capteur micromécanique) et leurs variantes appropriées pour les années 1980 à 1985 inclusivement.

Les résultats de cette enquête sont présentés au tableau 3. Il en ressort que les recherches sur les nouvelles technologies des capteurs ont surtout porté sur les fibres optiques. En effet, sur l'ensemble des articles de recherche publiés pendant cette période et traitant des technologies émergentes des capteurs, 75 % portaient sur les capteurs à fibre optique, 14 % seulement portaient sur les capteurs biologiques, 10 % sur les capteurs chimiques et moins de 1 % sur les capteurs micromécaniques. Mention-

Tableau 3. Technologies émergentes des capteurs : croissance relative, selon la fréquence des mots clés

	Type de capteur			
Année	Fibre optique	Biologique	Chimique	Micromécanique
1980	18	1	4	0
1981	32	6	7	0
1982	49	5	13	1
1983	93	9	13	1
1984	295	57	35	1
1985	268	57	26	4
Totaux	755	135	98	7

Source : Bases de données INSPEC et COMPENDEX, Institut canadien de l'information scientifique et technique, Conseil national de recherches, Ottawa.

nons cependant que ces trois derniers domaines sont relativement nouveaux et qu'ils devraient surpasser en importance les fibres optiques comme sujet de recherche au cours des quelques prochaines années.

Le nombre de conférences récentes portant sur la question, la mise sur pied d'associations, de centres et d'instituts ainsi que le parachèvement d'études importantes et la compilation de bases de données sont également un reflet de l'intérêt croissant suscité par les technologies des capteurs. Nous présentons, en annexe A, une liste de certaines des conférences qui ont porté sur les technologies des capteurs et des organisations qui s'y intéressent.

Le reste du présent chapitre est divisé en cinq sections, chacune portant sur un type particulier des technologies des capteurs : les capteurs à semi-conducteur, les capteurs à fibre optique, les capteurs micromécaniques, les capteurs chimiques et les capteurs biologiques. Chaque section définit la technologie émergente, en évalue les perspectives commerciales et précise certaines des applications possibles.

Capteurs à semi-conducteur

Le matériel semi-conducteur (silice) se prête à merveille à la transformation d'un phénomène physique en signaux électriques, habituellement analogiques, qui peuvent ensuite être convertis en données numériques aux fins du traitement par micro-processeur. Les capteurs à base de silice réagissent de façon prévisible aux changements de pression, de direction, d'accélération, de composition chimique, de température, de lumière, de niveau sonore, de radiations et d'ondes magnétiques.

La silice résiste à la corrosion et tolère une vaste gamme de températures. Elle peut fonctionner dans la gamme de fréquences des mégahertz et résiste à des pressions supérieures à 345 000 Kilopascals et à des forces d'accélération atteignant jusqu'à 100 000 g. Normalement, un capteur à base de silice peut maintenir une exactitude de mesures supérieure à 0,1 % pendant plusieurs années de fonctionnement ininterrompu. La mise au point et la production des capteurs à base de silice s'inspire de la même technologie fondamentale que celle qui est utilisée dans la production des circuits intégrés. On peut fabriquer d'un seul coup, sur des tranches de silicium, des lots de plusieurs centaines de ces capteurs. Cette technique de production de masse contribue à réduire le coût unitaire des dispositifs et d'en assurer l'uniformité.

Certains fabricants travaillent à la mise au point de micro-capteurs de silice à circuits électroniques intégrés. Le principal avantage de ces dispositifs intégrés est d'accroître la puissance des signaux relativement faibles provenant du capteur, aux fins du traitement.

Recherches aux Etats-Unis

A l'Université de la Californie, à Berkeley, les chercheurs ont mis au point un dispositif monopuce[3] comportant un détecteur infrarouge, un capteur tactile, un anémomètre, des accéléromètres multiples, un détecteur de gaz et un imageur à couplage de charge.

La société Motorola[4] a mis sur le marché son capteur de pression MPX100 en 1980. Ce dispositif simple, à base de silice, constitué d'une résistance unique et facilement reproductible, se prête plus aisément aux ajustements en fonction de la température qu'un pont de Wheatstone à quatre résistances. En 1984, cette société a lancé son capteur MPX2000 qui intègre les résistances passives et permet l'ajustement et l'étalonnage pour toute la gamme des températures. A l'automne 1986, elle a commercialisé son capteur de pression MPX3000. Ce dispositif comporte une jauge pour la mesure de la force de cisaillement et permet l'ajustement en fonction de la température et l'amplification du voltage, le tout avec une seule puce. Il se vend 60 dollars U.S. en lots de 100.

La société Concha Corp. de Californie vient tout juste de mettre sur le marché un système de contrôle de la pression des pneus utilisant un capteur à semi-conducteur fabriqué par la société Transensory Device Inc. de Fremont (Californie). Ce dispositif, installé sur la jante de la roue, avertit le conducteur lorsque la pression du pneu est trop basse. Le contrôle de la pression des pneus est important pour les voitures munies d'un système anti-dérapage car ces systèmes risquent de défaillir lorsqu'un des pneus est trop mou.

Marché des capteurs à semi-conducteur

Le marché total des capteurs aux Etats-Unis est évalué à environ un milliard de dollars par année[5] et sa croissance annuelle atteint 15 %. On pense que les capteurs à semi-conducteur représentent le cinquième environ de ce marché. Ils jouent par ailleurs un rôle fondamental dans chacune des autres technologies émergentes des capteurs.

Le Alberta Microelectronics Centre, à Edmonton, s'intéresse à la technologie des capteurs à semi-conducteur. Un groupe d'étude des capteurs magnétiques composé de trois professeurs et de deux étudiants de maîtrise étudie les magnétotransistors à effet latéral que l'on peut incorporer dans un dispositif de Darlington pour le contrôle à distance, sur le terrain, du courant de Foucault. Parmi les autres utilisations possibles de cette technologie, mentionnons les mesures reliées au géomagnétisme, l'extraction des données emmagasinées en mémoire magnétique, l'identification des codes inscrits à l'encre magnétique sur les billets de banque ou les cartes de crédit, la commutation sans contact, les détecteurs de déplacements linéaires et angulaires et les watts-heuremètres intégrés. Au nombre des réalisations antérieures du groupe de recherche, mentionnons la conception et la description de structures MOSFET sensibles aux champs magnétiques (MAGFET), un oscillateur à contrôle magnétique et un dispositif à effet Hall vertical. Ce groupe entretient des rapports étroits avec des chercheurs et des entreprises du Japon et de la Suisse.

Les autres activités du Alberta Microelectronics Centre portent entre autres sur la modélisation numérique de dispositifs à semi-conducteur, la recherche fondamentale sur l'application et les propriétés des matériaux en couche mince et l'utilisation des enduits en couche mince pour la mise au point de dispositifs de détection nouveaux. Toutes ces activités sont axées sur la recherche pour la mise au point d'une nouvelle technologie des capteurs.

Au département de physique de l'Université Simon Fraser, S.R. Morrison et R.F. Frindt mènent des recherches sur les détecteurs de gaz à semi-conducteur. En outre, en collaboration avec une entreprise locale, ils font l'expérimentation d'un dispositif de détection du dioxyde de carbone dans les véhicules de promenade et les automobiles.

Capteurs à fibre optique

Jusqu'à récemment, les fibres optiques étaient principalement considérées comme une solution de rechange pour remplacer les lignes de transmission classiques faites de fils de cuivre. Les lignes à fibres optiques facilitent la transmission de la voix, des signaux vidéos et des données à haute densité. A la fin des années 1970, des articles décrivant des capteurs à fibre optique ont commencé à être publiés dans des revues spécialisées dans la recherche et les applications des capteurs.

Il y a deux catégories de capteurs à fibre optique : les capteurs intrinsèques et les capteurs extrinsèques. Dans les capteurs intrinsèques, la fibre optique subit un changement physique en réaction au paramètre physique ou chimique contrôlé; par exemple, un changement dans l'indice de réfraction d'une fibre optique ou dans la distribution modale. Les capteurs extrinsèques, par contre, utilisent la fibre optique pour la

transmission de la modulation de l'intensité lumineuse, de la phase, de la polarisation, de la longueur d'onde ou du spectre, ou du temps (et de son inverse, la fréquence).

Les capteurs à fibre optique présentent plusieurs avantages[6] comparativement aux autres types de capteurs :

- haute sensibilité;
- adaptabilité géométrique;
- insensibilité aux interférences électromagnétiques;
- compacité, poids léger;
- durabilité;
- simplification des mesures à distance;
- élimination des risques de chocs électriques;
- résistance à la corrosion.

Les capteurs à fibre optique servent à faire des mesures de l'électricité, de la rotation mécanique, de la température, du magnétisme et des sons. Avant la fin du siècle, nous pourrions assister à un développement considérable des systèmes de captage photonique[7] dans les domaines de la médecine, de la pétrochimie, du pétrole et du gaz, de l'avionique, de l'automobile, des techniques sous-marines, des systèmes de contrôle environnementaux et agricoles, de l'équipement militaire et au sein des industries énergétiques et manufacturières.

Applications médicales

Actuellement, les capteurs à fibre optique[8] envahissent très rapidement les marchés de l'instrumentation médicale. Ils servent à une grande variété d'opérations, de la mesure de la pression intracranienne jusqu'à la mesure du gaz sanguin à l'aide de sondes à demeure. Leur usage accru en médecine provient du fait qu'ils sont très petits, très sensibles, électroniquement isolés, chimiquement inertes et extrêmement durables. Les analyses de la chimie du sang, l'oxymétrie et les mesures de la température et de la pression comptent parmi les principales utilisations médicales des capteurs à fibre optique. On estime que ces dispositifs sont utilisés dans la moitié des 370 000 opérations à coeur ouvert effectuées chaque année. Ce marché représente à lui seul 20 millions de dollars annuellement[9].

Applications industrielles

Les guides lumineux flexibles (fibres optiques et fibres en plastique) servent régulièrement dans l'industrie aux fins d'inspection et d'indication, en particulier lorsqu'il y a risque d'explosion ou lorsque l'isolation mécanique est requise. En outre, on a recours à la thermométrie infrarouge utilisant des guides lumineux flexibles pour mesurer la température (jusqu'à 1 850 °C) de surfaces difficiles d'accès dans les réacteurs, les installations de moulage par injection, les fours à induction et les installations de coulée continue.

Les capteurs à fibre optique qui font une percée sur les marchés industriels sont en majorité des capteurs extrinsèques. Ils servent à mesurer des paramètres physiques tels que la pression et la température. Par exemple, un pyromètre disponible sur le marché[10] est fait d'une fibre optique reliée à une tige de saphir se terminant par un corps noir muni d'une cavité. Le rayonnement provenant de cette cavité sert à mesurer la température. A 1 000 °C, un changement de la température de 1 % provoque une variation de 20 % du rayonnement avec une marge d'incertitude de seulement 0,05 % (exactitude 100 fois meilleure qu'avec les thermocouples). Ce dispositif a récemment été adopté par le National Bureau of Standards comme appareil standard pour la mesure de la température entre 630,74 °C (point de fusion de l'aluminium) et 1 769 °C (point de fusion du platine). Ce thermomètre à fibre optique a une résolution d'une partie sur 10 millions et une dérive inférieure à une partie sur 10 millions par heure.

On a également mis au point des capteurs à fibre optique[11] utilisables à températures plus basses. Certains de ces dispositifs utilisent des composés de phosphore. Le phosphore est un produit photoluminescent

dont les propriétés de rayonnement lumineux varient proportionnellement avec la température. Le phosphore placé à l'extrémité d'une fibre optique est excité par le rayonnement provenant d'une source lumineuse et les émissions qui en découlent sont détectées et analysées pour déterminer les caractéristiques qui dépendent de la température.

La société OpTech de Herdon (Virginie) fabrique un capteur de pression à fibre optique extrinsèque. Ce dispositif mesure le déplacement d'un diaphragme réfléchissant. Une diode électroluminescente (DEL) transmet la lumière au diaphragme à l'aide d'un fil fait d'une seule fibre. Le diaphragme réfléchit la lumière qui est retransmise par la fibre optique. L'intensité de la lumière réfléchie donne une mesure du déplacement du diaphragme dû à la pression exercée. Ce capteur fonctionne sur une gamme de pressions variant de 0 à 3 500 Kpa et à des températures variant de -55 à +125 °C avec une précision de 1 % et une définition de 0,05 % sur toute la gamme de températures.

Un capteur chimique extrinsèque capable de détecter des concentrations de toxiques de l'ordre de quelques parties par milliard[12] a été mis au point au Laboratoire national Lawrence-Livermore de Californie. Ce dispositif de télédétection par tunnel optique a été souligné par la revue Research and Development comme l'une des 100 principales réalisations techniques de 1985. L'extrémité d'une fibre est munie d'une particule de verre poreux plus petite qu'un grain de sable et sur laquelle sont appliqués un réactif et une substance chimique fluorescente. Le changement de couleur d'une seule molécule du réactif influe sur la lumière de 1 000 molécules fluorescentes. Le dispositif fait office, en réalité, d'amplificateur optique. Il sert à mesurer les teneurs en hydrogène sulfureux et en oxydes d'azote. Les oxydes d'azote sont des sous-produits de la dégradation des explosifs chimiques.

Les capteurs à fibre optique intrinsèques commencent également à faire une percée mais moins rapidement, cependant, que les capteurs extrinsèques. Par exemple, la British Gas Corporation[13] entrepose des liquides cryogènes, surtout du gaz naturel liquéfié, et utilise un détecteur de fuites à fibre optique. En choisissant soigneusement les indices de réfraction de la fibre et de sa gaine de manière qu'ils convergent lorsqu'on abaisse la température ambiante, on peut créer une boucle thermosensible. Un tel dispositif peut permettre de détecter une légère fuite du liquide cryogène dans les cinq secondes. L'intervalle de temps moyen estimatif écoulé entre deux défectuosités d'un tel système est de 14 ans. Normalement, la détection des fuites des liquides cryogènes est assurée par un grand nombre de thermocouples à pointes. Or, le nouveau capteur à fibre optique est non seulement plus facile à installer que des thermocouples mais il demande moins d'entretien.

Recherche canadienne sur les applications industrielles

Jusqu'à récemment, J.P. Legendre, de la section de génie électronique du Conseil national des recherches (CNRC), travaillait sur les capteurs à fibre optique. Il a en particulier mis au point un réflectomètre à fibre optique permettant de mesurer les changements dans l'indice de réfraction des liquides. Ce dispositif peut permettre entre autres de mesurer la contamination des liquides tels que le fréon (utilisé dans l'industrie de la réfrigération) par de l'huile.

J.P. Legendre a également démontré les possibilités du dispositif pour la mesure de la température. Un volume captif de liquide (de l'acétone) a été placé à l'extrémité d'une fibre optique. Le réflectomètre a servi à mesurer le changement dans l'indice de réfraction en fonction de la température. Ce dispositif assure une définition de 0,005 °C sur une gamme de températures variant de 5 à 50 °C.

Ce projet de recherche en réflectométrie a donné lieu à la délivrance d'un brevet

canadien et à la demande d'un brevet aux Etats-Unis. C'est la Société canadienne de brevets et d'exploitation Ltée qui a été chargée de la gestion de ce brevet. Récemment, le CNRC a demandé à M. Legendre de mettre un terme à ses recherches sur les capteurs à fibre optique.

Applications militaires

Des fonds importants accordés dans le cadre des programmes de défense pour la mise au point d'hydrophones et de gyroscopes à fibre optique intrinsèques ont donné lieu à la mise au point d'un certain nombre de dispositifs pratiques. Des appareils commerciaux rotatifs à fibre optique sont mis à l'essai par des utilisateurs militaires et civils à des fins variant des systèmes de guidage des missiles tactiques aux domaines de l'avionique et des gyrocompas. La société Thompson-CSF de Corbeville (France) a mis au point un gyroscope à fibre optique[14] dont le taux de dérive est de 0,3 degré par heure et dont le volume n'est que de 0,1 litre. Un gyrocompas à fibre optique[15] a servi dans le secteur pétrolier pour l'examen des trous de forage. Cet appareil permet de déterminer l'azimut à l'intérieur des tubages d'acier et de la garniture de forage. Grâce à cette technique, il n'est pas nécessaire de munir les trous de forage de masses-tiges non magnétiques. Le gyrocompas peut fonctionner à des profondeurs atteignant jusqu'à 6 000 mètres dans des conditions de température variant de 0 à 125 °C et il peut résister à des chocs de 1 000 g appliqués pendant 0,5 milliseconde et à des vibrations de 40 g atteignant jusqu'à 2 000 hertz. Il existe environ 20 compagnies, à travers le monde, travaillant à la technologie des gyroscopes à fibre optique.

Télémétrie

Dans les usines de transformation, il n'est pas rare qu'on ait recours à des techniques de télémétrie sur des distances atteignant 100 mètres et, dans certains cas, jusqu'à un kilomètre. On utilise habituellement pour cela un grand nombre de capteurs. Un système de captage à fibre optique à accès multiple serait de toute évidence d'une grande utilité pour le contrôle des procédés dans ce domaine. Un détecteur à balayage[16] à accès multiple à fibre optique comportant un moteur fractionnaire a été mis au point pour le scannage de 24 fibres optiques. Un capteur expérimental à fibre optique[17] a été mis au point pour étudier les possibilités d'utilisation de capteurs et de fibres optiques dans l'industrie et l'actionnement de soupapes de contrôle de l'approvisionnement par signaux transmis par une fibre optique. Le modèle de démonstration comprend huit capteurs optiques (six capteurs de pression, un capteur thermique et un capteur de débit), un multiplexeur central, une unité de contrôle et des dispositifs d'actionnement.

Marché des capteurs optiques

On a prévu que les ventes mondiales de capteurs à fibre optique passeraient de 26,3 millions de dollars en 1985 à 259,61 millions de dollars en 1994. Nous présentons, au tableau 4, une ventilation de ces ventes selon le type d'application.

La société Electronicast Corp. de Redwood (Californie)[19] a prévu des ventes de capteurs à fibre optique de 32,6 millions de dollars en 1986, de 188 millions en 1990 et de 818 millions en 1994. Ces prévisions ne portent que sur la vente des capteurs. Elles correspondent au triple environ des prévisions de la Market Intelligence Research Company (MIRC). Peu importe qui a raison, à partir du moment où des capteurs à fibre optique seront intégrés dans des systèmes, il est raisonnable de penser que les ventes atteindront les milliards de dollars d'ici à 1994.

Dans une étude récente portant sur le marché mondial des fibres optiques, lequel est évalué à 6,7 milliards de dollars[20], on prévoyait que d'ici l'an 2000, environ 70 % du marché serait occupé par les capteurs à fibre optique, avec, en tête, les gyroscopes et les capteurs à usage militaire. Au moins 15 % des capteurs (valeur de plus

Tableau 4. Marchés mondiaux des capteurs à fibre optique (millions de $)

	1985	1990	1994
Gyroscopes	-	9,28	43,77
Hydrophones	-	2,48	8,25
Moteurs d'avions	1,48	5,85	9,35
Automobiles	-	6,00	46,00
Machinerie et fabrication	7,00	23,00	40,00
Médecine	13,82	42,60	69,24
Contrôle des procédés	4,00	23,00	43,00
Totaux	26,3	112,21	259,61

Source : Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, Market Intelligence Research Company (MIRC), Palo Alto, Calif. (1985)

de un milliard de dollars) seront par ailleurs destinés à l'industrie et à la médecine.

L'Association japonaise d'optoélectronique et de développement technologique (OITDA) a signalé[21] que les capteurs à fibre optique représentaient 10 millions (0,8 %) de ses ventes totales de 1,25 milliard de dollars en optoélectronique en 1984.

Pour les capteurs comme pour la plupart des nouvelles technologies importantes, la "pression technologique" est le moteur principal du développement mais la "pression de la demande" commence déjà à avoir une certaine influence[22] sur les ventes de capteurs à fibre optique.

Capteurs micromécaniques

Les dispositifs micromécaniques[23] sont faits de silice au moyen de méthodes de micro-usinage. Ces techniques permettent de fabriquer des dispositifs mécaniques aussi petits que des dispositifs micro-électroniques. Les méthodes employées ressemblent à celles auxquelles on a recours pour la fabrication en lots de puces à circuits intégrés. En outre, le micro-usinage utilise des techniques de gravure chimique pour produire des formes tridimensionnelles comme des dépressions, des trous, des pyramides, des tranchées, des hémisphères, des structures cantilevers, des diaphragmes, des aiguilles et des murs.

Applications

La combinaison de ces éléments structuraux permet de produire une grande variété de dispositifs mécaniques. Parmi les micro-mécanismes de silice mis au point, mentionnons des soupapes, des ressorts, des miroirs, des gicleurs, des raccords, des têtes d'impression, des cartes de circuits imprimés, des puits thermiques et des capteurs pour la mesure de la pression, de l'accélération et de la concentration chimique.

On est parvenu à fabriquer un chromatographe servant à identifier les gaz dans un mélange inconnu et tenant sur un disque de silice[24] de quelques centimètres de diamètre. Cet instrument portatif permet de contrôler la qualité de l'air ou de mesurer la teneur énergétique des gaz transportés par gazoduc.

On est également parvenu à fabriquer par micro-usinage un puits thermique à haut rendement[25]. On procède à la gravure, sur une tranche de silicium, de minuscules sillons dans lesquels circulera un liquide refroidissant, et des dispositifs électroniques ultrarapides sont fabriqués sur le côté opposé de la tranche. Comme la silice présente une haute conductivité thermique, ces dispositifs sont extrêmement efficaces. Ils permettent en effet de dissiper plus de 1 000 watts par centimètre carré.

On travaille actuellement à la mise au point d'accéléromètres et de capteurs de pression avec dispositif de conditionnement du signal sur la même tranche de silicium. Un accéléromètre conçu par le laboratoire de recherche de la société IBM à San Jose[26] comporte un levier surplombant une légère dépression. Le levier et la surface plane de silice située au fond de la dépression jouent un rôle analogue aux deux plaques d'un condensateur à espace d'air variable. L'extrémité libre du levier est munie d'un renflement en or. Si on imprime à la puce un mouvement soudain, l'inertie de l'or provoque l'inflexion du levier, changeant ainsi l'espace d'air ménagé entre ce dernier et le fond de la dépression et, de ce fait, la capacité. Cet instrument a une sensibilité de deux millivolts par g.

La société Litton Industries[27] prévoit que les accéléromètres micro-usinés seront dix fois moins lourds et dix fois moins volumineux que les accéléromètres actuels et qu'ils seront suffisamment peu coûteux pour servir dans les systèmes de guidage des missiles.

Les capteurs de pression sont les dispositifs micro-usinés à base de silice les plus utilisés actuellement. Il y en a deux catégories principales : les capteurs piezorésistifs et les capteurs capacitifs. Les résistances électriques gravées sur le diaphragme mince et flexible d'un capteur piezorésistif changent de résistance selon le degré de déformation du diaphragme. Dans le cas des capteurs capacitifs, le diaphragme flexible correspond à une des plaques du condensateur à espace variable.

La société japonaise NEC Corp.[28] juge que les capteurs de pression micromécaniques seront utiles dans la fabrication des aspirateurs, où ils pourront servir à ajuster automatiquement la force de succion en fonction du type de tapis nettoyé. La société Millar Instruments Inc. de Houston (Texas)[29] installe ces capteurs à l'extrémité des sondes, créant ainsi un dispositif de contrôle de la pression sanguine d'un millimètre de section qui permet de procéder à des mesures précises à l'intérieur des vaisseaux sanguins.

On parvient également à intégrer des capteurs micromécaniques et des processeurs sur la même tranche de silicium. Les capteurs intégrés résistent bien aux bruits et aux fuites. Ils servent à toutes sortes de fins, par exemple, dans des endroits caractérisés par des conditions très rudes comme sous le capot d'une voiture ou encore, pour des opérations de contrôle biomédical. On travaille également à la mise au point de

puces de silice uniques portant plusieurs types de capteurs mesurant, par exemple, la température et la pression. A l'avenir, les dispositifs micromécaniques tenant sur une seule puce seront en mesure de capter un signal analogique et de le convertir en signal numérique.

La silice n'est pas le seul matériau se prêtant au micro-usinage.[30] L'arséniure de gallium et certaines céramiques servent également à cette fin à cause de leur grande résistance à la chaleur. La société Hitachi a mis au point un "renifleur" à puce de céramique qui peut identifier 30 gaz différents à des concentrations très faibles. La société Yokogawa Hokushin Electric[31] travaille au micro-usinage d'une minuscule jauge de contrainte faite de cristal de quartz. Installé sur la structure des ponts ou des avions, un tel appareil pourrait donner l'alerte en cas de danger imminent causé, par exemple, par la défectuosité d'une cloison.

Le directeur général du groupe Solartron Transducer de la société Schlumberger Ltd. a signalé qu'il n'existe, à travers le monde, que 40 à 50 experts en technologie du micro-usinage. La crainte de ne pas pouvoir obtenir facilement l'aide d'un tel expert a incité Schlumberger à acheter des parts dans la société NovaSensor, une entreprise de fabrication de puces micromécaniques fondée en 1985 par trois chercheurs des sociétés IBM, Honeywell et Kulite Semiconductor.

Le marché des capteurs micromécaniques

Selon la Mackintosh International, une société d'étude des marchés de Londres, les ventes mondiales de dispositifs micromécaniques[33] ont atteint 250 millions de dollars et elles devraient atteindre au moins 630 millions de dollars d'ici à 1990. D'importantes entreprises européennes croient pouvoir tirer profit de leur expérience en génie micromécanique pour s'accaparer une part importante de ce marché.

Un cadre de la société PA Technology[34] de Belgique prévoit que les ventes européennes de capteurs micromécaniques augmenteront plus rapidement que les ventes aux Etats-Unis ou au Japon. Il prévoit que les producteurs européens verront leur part de ce marché mondial passer de 17 % actuellement à 22 % d'ici à 1990.

Capteurs chimiques

Les capteurs chimiques sont des dispositifs chimiosensibles transistorisés. Leur mise au point a été rendue possible grâce aux progrès réalisés en microlithographie pour la fabrication de microprocesseurs et de circuits intégrés.[35] Pour fabriquer des capteurs chimiques, on dépose sous vide un mince film de métal, de substance diélectrique ou de semi-conducteur sur une base de silice. Le fonctionnement du capteur est fondé sur l'interaction entre le matériau déposé et les substances chimiques avec lesquelles il entre en contact.

Les capteurs chimiques[36] sont surtout destinés à mesurer les teneurs en substances chimiques. Le nombre des substances que l'on peut ainsi chercher à mesurer est presque illimité. Le nombre de polluants gazeux différents présents dans l'air ou le nombre de protéines présentes dans le corps humain sont tellement élevés que la sélectivité et la spécificité deviennent des caractéristiques essentielles des capteurs chimiques.

Les capteurs chimiques peuvent servir à d'innombrables applications. On procède ou on devrait procéder à des dosages chimiques dans presque tous les domaines technologiques. Les laboratoires de chimie, les cliniques médicales et les endroits où l'on a recours à des procédés industriels ou à des bioréacteurs sont ceux où l'utilité des capteurs chimiques est la plus évidente[37]. Il est également possible d'imaginer le recours à ces dispositifs pour le contrôle de la fraîcheur des aliments dans les magasins, l'analyse des plantes et des sols, le contrôle de la pollution de l'air, etc.

Applications médicales

L'établissement des diagnostics médicaux[38] dépend dans une large mesure des dosages chimiques, et beaucoup des tests nécessaires sont effectués dans des laboratoires cliniques. Les dosages chimiques médicaux classiques sont toutefois longs et coûteux. Des capteurs chimiques peu coûteux, résistants et d'un fonctionnement simple faciliteront la décentralisation des opérations de dosages chimiques, lesquelles pourront ainsi être réalisées dans les divers services des hôpitaux, au bureau du médecin ou même à la maison. On travaille à la mise au point de capteurs chimiques permettant le contrôle continu des paramètres chimiques des patients soumis à des soins intensifs. On utilise déjà des installations permettant le contrôle des gaz anesthésiques, des gaz sanguins comme l'oxygène et le dioxyde de carbone ainsi que de l'acidité. On travaille finalement à la mise au point de capteurs chimiques permettant de contrôler les teneurs en potassium, en calcium et en d'autres substances.

Recherche canadienne sur les capteurs chimiques

Au Alberta Microelectronics Centre, on travaille à la mise au point d'un détecteur de glucose en collaboration avec D.J. Harrison, du département de chimie de l'Université de l'Alberta et de W.A.G. Voss, un spécialiste des systèmes électromagnétiques de Victoria. L'objectif est de mettre au point un détecteur de glucose ampérométrique à CMOS intégré et miniaturisé qui puisse être implanté. On étudie également la possibilité d'utiliser des dispositifs à ondes acoustiques de surface agissant comme transducteurs pour le dosage du glucose. Ces chercheurs entretiennent des rapports étroits avec la société Siemens Medical d'Allemagne de l'Ouest.

Le groupe d'étude sur les détecteurs d'humidité travaille à la mise au point d'un système capacitif intégrant la technologie des CMOS et muni d'un film de fluorure de magnésium pour l'absorption de l'eau.

A l'Université de Toronto, M. Richard Cobbold travaille principalement sur les capteurs chimiques et acoustiques. M. Cobbold est le seul Canadien siégeant au comité de rédaction d'une importante revue technique : The Journal of Sensors and Actuators.

Applications industrielles

Dans le domaine des procédés industriels[39], un certain nombre de paramètres chimiques devraient être contrôlés afin d'optimiser les procédés du point de vue de l'efficacité et de la qualité. Pour tirer pleinement profit de la technologie des microprocesseurs dans le contrôle efficace des procédés, on pourrait recourir à des capteurs chimiques pour effectuer des mesures directes en continu. Dans la plupart des cas cependant, cela n'est pas encore possible car il n'existe pas de capteurs chimiques suffisamment sensibles, sélectifs, stables et durables.

Contrôle environnemental

Le contrôle environnemental[40] est un autre des champs d'application des capteurs chimiques en général et des détecteurs de gaz en particulier. On a déjà démontré les graves conséquences médicales que peut entraîner l'exposition prolongée des gens à des quantités même infimes de gaz toxiques. Les responsables de l'hygiène publique ont besoin d'instruments portatifs pour effectuer les contrôles et l'industrie a besoin de systèmes d'alarme pour protéger les employés contre les teneurs élevées en substances toxiques et en gaz explosifs.

Les semi-conducteurs[41] jouent un rôle important dans la technologie des capteurs chimiques à cause de leur conductivité variable. Les capteurs les plus fréquemment utilisés pour la détection des gaz combustibles sont faits à partir d'oxydes métalliques semi-conducteurs. Par exemple, lorsqu'on procède à la chimisorbtion de l'oxygène sur une mince couche d'oxyde métallique, les électrons se placent à la surface. On abaisse ainsi la conductivité de cette surface. Lorsque l'oxyde métallique

est exposé à un gaz qui réagit avec l'oxygène ainsi absorbé, sa résistivité diminue. A des températures de quelques centaines de degrés Celcius, ce phénomène est rapide et réversible. Beaucoup de gaz réagissent avec l'oxygène en surface. En ajoutant une substance catalytique, on a réussi à accroître la réactivité et la sélectivité du système pour certains gaz particuliers. Les capteurs à oxyde métallique sont souvent utiles comme détecteurs de gaz mais leur utilisation pour les mesures quantitatives sont limitées. Des capteurs faits d'une mince couche d'oxyde métallique ont été mis au point pour la détection du méthane aux fins du contrôle des vapeurs inflammables, du monoxyde de carbone qui peut être produit par la combustion de certaines substances et de l'éthanol pour les ivressomètres.

Des matériaux organiques semi-conducteurs ont également été utilisés pour la détection des gaz, mais dans une moindre mesure cependant. Les résistances à sensibilité chimique sont des semi-conducteurs organiques dont la résistance électrique est modifiée par les vapeurs et les gaz ambiants. Ils se caractérisent par une résistivité inhérente élevée. La phtalocyanine est un semi-conducteur organique qui a servi à l'élaboration de détecteurs d'oxyde nitreux extrêmement sensibles et fiables[42] pour l'industrie minière. Par ailleurs, des capteurs à base de phtalocyanine très sensibles aux vapeurs organiques et inorganiques ont également été mis au point. Finalement, des polymères organiques conducteurs[43] ont servi à élaborer un détecteur d'ammoniac simple et peu coûteux.

Capteurs chimiques à sélectivité ionique

Les électrodes à sélectivité ionique[44] servent depuis de nombreuses années dans les domaines de la recherche, des procédés industriels et de l'analyse clinique pour la détermination de la teneur en ions du sang, de la sueur, de l'urine, de l'eau de mer, des eaux usées, des sols, des argiles, de l'eau potable, des aliments, des vins et d'autres substances. La plus connue est l'électrode de verre à sélectivité ionique utilisée pour la mesure de l'acidité. La taille de ces capteurs est l'un de leurs principaux inconvénients. On cherche donc à mettre au point de nouveaux types d'électrodes à sélectivité ionique. Par exemple, on a réussi à mettre au point un appareil de mesure de l'acidité hautement miniaturisé fait d'un fil métallique enduit d'une membrane de polymère à sélectivité ionique[45].

On travaille également à la mise au point de micro-capteurs[46] chimiques multivalents. On a réussi à placer sur une tranche de silicium une série d'électrodes à sélectivité ionique et les systèmes électroniques voulus de conditionnement du signal. Un prototype de capteur multivalent[47] a été mis au point pour la mesure de l'acidité (pH 0,5 à 13,5) ainsi que des ions de chlore, de brome, d'iode et de soufre (10^{-5} à 10^{-1} M, soit l'étendue de concentration linéaire) avec un temps de réaction de cinq secondes. Le contrôle de la qualité de l'eau, la transformation des aliments, la fabrication de produits pharmaceutiques, la culture des tissus, l'agriculture, l'élevage et l'industrie du pétrole et de la pétrochimie ne sont que quelques-uns des domaines où des instruments et des systèmes de contrôle chimique multivalents pourraient être d'une grande utilité.

Transistors à effet de champ (T.E.C.) chimiquement sensibles

Dans un T.E.C. chimiquement sensible, la grille est remplacée par un film métallique enduit d'un matériau sensible aux ions. Ce système réagit avec les ions présents dans la solution testée et cette interaction influe sur le champ au niveau de la grille et modifie ainsi le courant drain. Au nombre des expériences d'utilisation de prototypes de ces appareils[48], mentionnons le contrôle de solutions et la réduction de gaz ainsi que la détection d'enzymes et d'anticorps. Des capteurs à T.E.C. chimiquement sensibles[49] ont été mis au point pour la détection de l'oxygène, de l'ammoniac, de l'acide acétique, du monoxyde de carbone, de l'arsine et

de la vapeur d'eau. L'industrie alimentaire travaille pour sa part à l'élaboration de capteurs de ce type pour la détection de l'activité microbienne.

Microdiélectromètres
Les microdiélectromètres[50] permettent de contrôler la constante diélectrique d'un milieu donné. L'intégration sur une même puce d'un T.E.C. et d'une microélectrode permet de mesurer des courants de très faible intensité. Cela permet d'obtenir des données diélectriques sur une très large gamme de fréquences. Les dispositifs comportant une puce avec capteur thermosensible intégré servent à contrôler le durcissement des résines époxy et laissent entrevoir des possibilités intéressantes pour le contrôle de l'humidité.

Capteurs à ondes acoustiques de surface
Les capteurs à ondes acoustiques de surface[51] sont faits de substrats piezoélectriques entre lesquels sont intercallées des séries d'électrodes servant de transmetteurs et de récepteurs. Lorsqu'un transmetteur est excité à une fréquence de résonnance, des ondes de Rayleigh sont induites dans le substrat. Ces ondes sont reconverties en signaux électriques au niveau du récepteur. Des variations des caractéristiques de la surface (100 microns) dues à l'absorption et à la condensation produisent des variations mesurables de la fréquence. Ces capteurs sont utilisés pour la détection de quantités d'eau, d'anhydride sulfureux, d'hydrogène et de composés organophosphorés de l'ordre des parties par million.

Optrodes chimiosensibles
Les "optrodes" chimiosensibles[52] utilisent des fibres optiques. Un réactif est placé à l'extrémité de la fibre optique. Un changement de couleur ou des propriétés optiques signale la présence d'une substance d'intérêt. Dans les optrodes destinées à la détection de l'oxygène, le gaz diffuse à travers une membrane en téflon dans une phase réactive où il donne lieu à un phénomène de chimioluminescence. Des détecteurs semblables sont employés pour l'acidité, le dioxyde de carbone, le glucose, l'oxyde d'uranium et les halides. Les optrodes à réflectance sont également efficaces pour la détection de l'ammoniac et de l'huile dans l'eau.

Capteurs à céramiques chimiosensibles
On étudie actuellement les propriétés chimiosensibles des céramiques[53]. Les céramiques sont des corps non métalliques, inorganiques, traités sous des conditions particulières de chaleur ou de pression. Les céramiques haute performance sont faites de matières premières dont la composition est soigneusement contrôlée. Elles peuvent présenter de nombreux avantages, y compris l'aptitude à résister à de hautes températures et à la corrosion. Elles présentent des propriétés électriques particulières, résistent à l'usure, et sont à la fois dures, résistantes et biocompatibles.

Marché des capteurs à céramiques
C'est dans le domaine de l'industrie automobile que les capteurs chimiques à céramiques connaissent leur plus forte croissance commerciale. Les Japonais détiennent la plus grosse part du marché des capteurs à céramiques pour la détection de l'humidité dans les fours à micro-ondes et les magnétoscopes, et des capteurs de gaz combustibles pour la détection de fuites de gaz naturel dans les foyers. Les ventes mondiales de céramiques haute performance[54] ont été évaluées à 5,2 milliards de dollars en 1985. Le taux de croissance estimatif global devrait être de 16 % par année de 1985 à 1990. C'est dans le secteur des capteurs à céramiques que le marché des céramiques devrait connaître sa plus forte croissance avec un taux prévu de 28 % par année.

Capteurs biologiques
Les capteurs biologiques[55] sont des systèmes d'analyse faits d'un matériau immobilisé mis en contact avec un dispositif propice de transmission capable de convertir un signal biochimique en un signal électrique ou optique. Les molécules biologiques sont

capables de reconnaître une seule molécule ou un petit groupe de composés et de réagir spécifiquement au contact de cette molécule ou de ce groupe. Les produits biologiques qui ont déjà été utilisés dans de tels capteurs sont les enzymes, les anticorps, les neurorécepteurs, des organismes entiers et des tissus.

Pour servir dans un capteur biologique, le matériel biologique[56] doit être immobilisé sur un dispositif de transmission. La méthode utilisée pour parvenir à ce résultat varie de l'immobilisation du matériel par des membranes synthétiques et des matrices de gélose à l'absorption ou à la liaison chimique du matériel à une surface quelconque. On a déjà immobilisé du matériel biologique sur des électrodes, des transistors à effet de champ, des fibres optiques, des thermistors et des cristaux piézoélectriques.

Il faut prendre garde de ne pas inactiver le matériel biologique. A l'heure actuelle, les enzymes ainsi préparées durent de trois à quatre semaines ou pour 50 à 200 essais. La plupart des capteurs biologiques doivent être utilisés dans une solution aqueuse. A l'avenir, des capteurs biologiques seront peut-être implantés de manière à assurer un contrôle continu des paramètres biochimiques d'un patient. On a déjà fait la démonstration d'un détecteur de glucose implanté[57] qui peut fonctionner pendant quatre jours.

Recherche canadienne sur les neurorécepteurs

A l'Université de Toronto, il existe un groupe de recherche sur les biocapteurs dirigé par Michael Thompson et Ulrich Krull. Il s'agit d'un groupe interdisciplinaire formé de spécialistes de la biochimie des récepteurs, de la physique et des membranes lipidiques. Ce groupe compte deux professeurs, quatre adjoints à la recherche, sept étudiants diplômés et un certain nombre d'étudiants de premier cycle travaillant à temps partiel.

Ces chercheurs travaillent sur un dispositif comportant des neurorécepteurs enrobés dans une double couche de membranes lipidiques. En collaboration avec des chercheurs de l'Université du Utah, l'équipe a pour objectif de relier cette membrane à un dispositif à semi-conducteur à sélectivité ionique. Si l'expérience réussit, elle aura permis de mettre au point les méthodes de base qui permettront de lier d'autres neurorécepteurs à des dispositifs semi-conducteurs. Il existe des centaines de types de neurorécepteurs, chacun sensible à un neurotransmetteur précis. De tels dispositifs permettront entre autres de détecter des substances biochimiques biologiquement actives et, peut-être, de mettre au point des terminaisons nerveuses artificielles qui pourront remplacer des nerfs endommagés. Le groupe de chercheurs doit encore surmonter de très nombreuses difficultés avant d'atteindre son but et les retombées commerciales du projet risquent de ne venir qu'au bout d'un certain nombre d'années.

Le groupe prévoit que d'ici cinq à dix ans, il existera des biocapteurs jusqu'à 10 000 fois plus sensibles que les dispositifs électrochimiques actuels. Cette recherche est financée par le Conseil national de recherches, la Defense Advanced Research Projects Agency et la société Allied Signal (Canada).

Applications industrielles

Les biocapteurs ont servi à détecter des substances importantes du point de vue environnemental ou industriel. L'enzyme cholinestérase[58], qui est inhibée par les pesticides et les gaz neurotoxiques, est utilisée dans le détecteur portatif de gaz neurotoxiques THORN EMI NAIAD. Ce dispositif peut détecter un agent neurotoxique sous forme de vapeur ou d'aérosol à des concentrations d'à peine 0,005 milligrammes par mètre cube. Les biocapteurs ont également servi à détecter la présence de phénols dans les égouts ainsi que d'acides, d'alcools, de

nitrates et d'ammoniac dans les eaux usées et aux cours des procédés industriels.

Le groupe de Karube[59], à l'Institut de technologie de Tokyo, a mis au point des biocapteurs qui sont actuellement disponibles sur le marché. Au nombre de ces dispositifs, mentionnons un détecteur d'hypoxanthine servant à déterminer la fraîcheur du poisson, un détecteur d'acide acétique utile en transformation des aliments et un détecteur de mutagènes qui utilise des cellules entières (bactéries) pour détecter des substances chimiques risquant de causer le cancer.

Capteurs à électrodes

La mise au point des premiers biocapteurs à électrodes[60] remonte à plus d'une vingtaine d'années. Ces dispositifs servaient au début à mesurer le taux de glucose sanguin. Ils servent aujourd'hui pour mesurer les teneurs en cholestérol, en créatinine, en lactate, en acides aminés, en triglycérides et en urée.

Transistors à effet de champ (T.E.C.) biologiques

La fabrication des T.E.C. biologiques obéit à peu près aux mêmes principes que celle des T.E.C. chimiques. La grille est remplacée par une membrane contenant une enzyme immobilisée. Une réaction de l'enzyme modifie le champ électrique. Des prototypes de T.E.C. biologiques ont servi à doser la pénicilline et l'ammoniac.[61] On a déjà suggéré d'utiliser ces dispositifs pour la détection hâtive de la corrosion dans les pipelines et les réservoirs de pétrole.[62] Le T.E.C. biologique présente l'avantage de n'utiliser qu'une très petite superficie de détection (typiquement, 0,5 mm^2). Jusqu'à maintenant, ces détecteurs se sont avérés difficiles à fabriquer. Les méthodes employées demandent beaucoup de travail et le taux d'échec est élevé.

Capteurs bioluminescents

La bioluminescence est une réaction biologique qui produit de la lumière. On a déjà tenté de mettre au point des capteurs biologiques tirant profit de cette réaction. L'enzyme luciférase[63] a été immobilisée à l'extrémité d'une fibre optique. Ce biocapteur peut détecter la présence de l'ATP (un composé biologique important) à des concentrations de 5×10^{-7} grammes par millilitre en quatre secondes. Par ailleurs, une technique bioluminescente a été mise au point pour détecter dix attomoles (10^{-17} moles) de TNT.[64] Une autre façon de tirer profit de la bioluminescence est de lier un anticorps marqué par une substance fluorescente à la substance contrôlée. La fluorescence est détectée à l'aide d'une fibre optique.

Capteurs à thermistance

Les capteurs biologiques à thermistance sont fondés sur la détection de la chaleur produite pendant une réaction exothermique. On a démontré l'existence de variations de la chaleur d'à peine 0,01 °C[65] avec un certain nombre d'analyses telles que celles portant sur les teneurs en sucre ou en médicaments du sang.

Capteurs piézoélectriques

Les capteurs biologiques à cristal piézoélectrique sont fondés sur un changement de masse survenant à la surface d'un cristal de quartz piézoélectrique. La fréquence de vibrations d'un cristal en oscillation diminue lorsqu'un corps étranger est absorbé à la surface. Cette technique a servi à la mise au point d'un prototype de détecteur de formaldéhyde[66]. Toutefois, la fabrication de ces capteurs biologiques exige énormément de travail, coûte très cher et présente un taux d'échec élevé.

Le marché des capteurs biomédicaux

On s'attend que le marché des capteurs biomédicaux[67] dépasse le milliard de dollars d'ici à 1990, la croissance actuelle de ce marché atteignant 12 % par année.

4. ACTIVITES ET INTERET MANIFESTE AU CANADA

Les perspectives de développement des technologies émergentes des capteurs sont évidentes. Pourtant, les Canadiens ne semblent pas montrer beaucoup d'empressement à tirer profit des possibilités offertes ni même à planifier quoi que ce soit en ce sens. Notre enquête a révélé qu'il n'existe au Canada que quelques groupes de recherche de calibre international qui ne disposent par surcroît que de fonds limités. Une poignée seulement d'étudiants diplômés travaillent dans le domaine de la technologie des capteurs. En outre, l'industrie en général ne semble pas très consciente des possibilités que présente cette technologie émergente.

Activités et orientation

Pour déterminer l'ampleur et l'orientation des activités menées dans le domaine des technologies émergentes des capteurs au Canada, l'auteur a distribué un questionnaire, procédé à de nombreuses entrevues personnelles et fait un relevé des subventions accordées récemment par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG). Le questionnaire a été envoyé à 53 membres de l'Association canadienne de technologie avancée, aux 64 personnes qui, selon une enquête précédente du Conseil des sciences*, jugeaient que les technologies émergentes des capteurs étaient susceptibles de revêtir une grande importance pour le Canada au cours de la prochaine décennie et à 20 autres personnes jugées compétentes dans le domaine des technologies émergentes des capteurs. Soixante-et-onze personnes (52 %) ont répondu à ce questionnaire. De ce nombre, 41 ont fait savoir qu'elles travaillaient actuellement à l'évaluation, à la mise au point ou à l'application des technologies émergentes des capteurs (tableau 5). Selon ces sources, les activités canadiennes dans le domaine sont principalement axées sur la technologie des capteurs à fibre optique (tableau 6).

Centres universitaires et subventions de recherche

La liste des bénéficiaires de subventions du CRSNG en 1985-1986 laisse voir que 20 personnes ont reçu des subventions pour des travaux portant directement ou indirectement (selon l'auteur) sur les technologies émergentes des capteurs. Le montant total de ces subventions atteignait 461 705 $.

Selon cette liste, deux centres universitaires seulement (Université de Toronto et Université de l'Alberta) consacrent des efforts intenses à la recherche sur les technologies émergentes des capteurs. Deux subventions de 34 560 $ et de 17 500 $ ont été accordées à des chercheurs du département de chimie de l'Université de Toronto pour la recherche portant sur les capteurs biologiques et chimiques. Quatre autres subventions de 37 248 $, 24 000 $, 18 700 $ et 17 280 $ ont été accordées à des chercheurs des départements de génie électrique et de chimie de l'Université de l'Alberta pour la recherche portant sur les dispositifs à membrane, les dispositifs chimiosensibles, la technologie des capteurs à base de silice, les capteurs transistorisés intégrés et la modélisation des capteurs. Les autres subventions (quatre au Québec, neuf en Ontario et une au Manitoba) ont été consacrées à une vaste gamme d'activités de recherche variant de la détection tactile tridimensionnelle pour les mâchoires de robots (14 400 $) aux céramiques piézoélectriques améliorées pour transducteurs ultrasoniques à haute fréquence (46 880 $). L'auteur a par ailleurs interviewé 20 chercheurs, experts-conseils et représentants de l'industrie afin d'en savoir plus sur la portée, l'orientation et la qualité des activités portant sur les technologies émergentes des capteurs au Canada. Ces entrevues ont été menées à Toronto, à Ottawa, à Saskatoon, à Edmonton, à Vancouver et à Victoria. Elles ont permis de constater que dans beaucoup de cas, les recherches univer-

* En 1984-1985, le Conseil des sciences, dans le cadre de son programme des sciences et technologies émergentes, faisait parvenir un questionnaire à plus de 11 000 chercheurs et ingénieurs canadiens. Plus de 3 600 personnes ont répondu à ce questionnaire et parmi elles, 64 ont mentionné les possibilités présentées par les technologies des capteurs.

Tableau 5. Activités portant sur les technologies émergentes des capteurs au Canada

Répondants	Oui	Non	Total
Chercheurs	14	6	20
Industrie	20	18	38
Gouvernements	4	2	6
Experts-conseils	3	4	7
Totaux	41 (58 %)	30 (42 %)	71

Source : Questionnaire de l'auteur

Question : Travaillez-vous actuellement à l'évaluation, au développement ou aux applications des technologies émergentes des capteurs?

Tableau 6. Orientation des activités de recherche sur les technologies émergentes des capteurs au Canada

Répondants[1]	F.o.	Bio.	Chim.	Micr.	Semi.	Autres[2]
Chercheurs	4	1	3	1	2	3
Industrie	14	2	2	5	2	3
Gouvernements	3	1	-	2	-	-
Experts-conseils	1	1	1	1	-	-
Totaux	22	5	6	9	4	6

Source : questionnaire de l'auteur

Nota :

1. Certains des répondants travaillent à l'évaluation, au développement ou aux applications de plus d'un type de capteur.
2. La catégorie "autres" renferme les personnes ayant fait mention d'activités qui, selon l'auteur, appartiennent au domaine des technologies classiques des capteurs.

Question : Dans l'affirmative, quel type de technologie émergente des capteurs travaillez-vous à évaluer, à développer ou à mettre en application? (Fibres optiques (F.o.), capteurs micromécaniques (Micr.), biocapteurs (Bio.), capteurs chimiques (Chim.), capteurs à semi-conducteur (Semi.) ou autres).

sitaires portant sur les technologies des capteurs sont menées en étroite collaboration avec l'industrie mais qu'il ne s'agit pas nécessairement de l'industrie canadienne.

Le Alberta Microelectronics Centre, à Edmonton, renferme un groupe de recherche sur les capteurs, dirigé par M. Henry Baltes. Ce groupe s'intéresse surtout aux détecteurs magnétiques à semi-conducteur, aux détecteurs de glucose et aux détecteurs d'humidité.

A l'Université de Toronto, il existe un groupe de chercheurs sur les biocapteurs dirigé par Michael Thompson et Ulrich Krull. Ce groupe interdisciplinaire travaille à la mise au point d'un dispositif utilisant des neurorécepteurs enveloppés dans une double membrane lipidique. Un autre chercheur de cette université, M. Richard Cobbold, s'intéresse principalement aux capteurs chimiques et acoustiques.

Jusqu'à récemment, M. J.P. Legendre, de la section de génie électronique du Conseil national de recherches, travaillait sur les capteurs à fibre optique. Ses travaux ont débouché sur la mise au point d'un réflectomètre.

Au département de physique de l'Université Simon Fraser, S.R. Morrison et R.F. Frindt s'intéressent aux détecteurs de gaz à semi-conducteur.

Intérêt manifesté par l'industrie

Les enquêtes menées auprès des représentants de l'industrie et des experts-conseils n'ont pas permis de recueillir beaucoup de détails sur la nature des recherches menées dans le domaine des technologies des capteurs. Cette situation est probablement due au secret dont on entoure les recherches menées dans ce domaine. Les résultats des entrevues laissent deviner un certain intérêt de l'industrie pour les technologies émergentes des capteurs, mais cet intérêt semble moins évident que dans les instituts de recherche. Cette différence n'est pas inattendue, compte tenu du caractère émergent de cette technologie. Les chercheurs engagés dans la recherche fondamentale montrent normalement plus d'intérêt pour les nouvelles technologies que ceux qui font la recherche appliquée dans l'industrie. Toutefois, les représentants de l'industrie et les experts-conseils se sont dits inquiets du manque d'intérêt manifesté dans l'ensemble des secteurs industriels canadiens pour les technologies émergentes des capteurs.

Autres projets

Les entrevues menées par l'auteur ont permis de mettre à jour divers autres projets canadiens portant sur les technologies des capteurs. Par exemple, M. George Ruddle, du ministère fédéral de l'Energie, des Mines et des Ressources (EMR), a signalé qu'entre 1981 et 1984, l'Association pour la recherche dans l'industrie sidérurgique canadienne avait procédé, avec l'aide d'EMR, à une étude portant sur l'utilité des capteurs pour l'assurance de la qualité des produits dans le secteur canadien de l'acier et avait publié quatre rapports sur cette question.

M. Jim Hutch, président du Saskatchewan Research Council, a signalé que le Conseil étudie actuellement la possibilité de mettre sur pied un centre de technologie des capteurs optiques. L'étude portera notamment sur les possibilités d'éducation, de recherche et de développement dans le domaine des capteurs à fibre optique à l'échelle de la province.

5. DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

La technologie des capteurs : perpectives et risques possibles

Les nouveaux systèmes fondés sur les technologies émergentes des capteurs rendront les anciens systèmes désuets. Les nouveaux capteurs seront moins coûteux, plus fiables, plus sélectifs, et seront capables d'effectuer de nouvelles tâches.

L'occasion nous est donnée d'entreprendre des recherches qui mèneront à la conception et à la mise au point de nouveaux capteurs et de nouveaux systèmes de détection. Les possibilités commerciales de ces systèmes sont intéressantes. Déjà, le marché mondial des capteurs classiques est évalué à 2,2 milliards de dollars. A mesure que de nouveaux capteurs moins coûteux et plus efficaces seront mis au point, ce marché devrait connaître une croissance rapide.

Par la même occasion, nous pourrions tirer avantage d'une bonne planification visant à pourvoir les industries canadiennes et d'autres secteurs des systèmes de détection ainsi perfectionnés. Nous pourrions donc bénéficier non seulement de la vente des nouveaux systèmes, mais également de leur utilisation afin de devenir plus productifs, plus efficaces et plus compétents.

Si nous ne saisissons pas l'occasion qui nous est donnée, nous risquons non seulement de nous trouver dans l'impossibilité d'accroître nos marchés ou nos profits, mais également et surtout de ne plus être en mesure de soutenir la concurrence.

Le Canada risque de manquer le bateau

Les perspectives de développement des technologies émergentes des capteurs sont de plus en plus évidentes. Cependant, il n'est pas certain que les Canadiens soient prêts à tirer leur épingle du jeu.

Où sont les groupes de recherche? Notre enquête n'a permis de découvrir qu'une poignée de groupes de recherche sur les capteurs de calibre international. En plus, même ces quelques groupes semblent manquer de fonds. L'aide financière moyenne accordée à chacun des bénéficiaires d'une subvention de recherche est évaluée à environ 23 000 $. Elle suffit à peine pour réaliser des progrès importants dans le domaine de la technologie des capteurs.

Nous avons également constaté qu'il n'y a que très peu d'étudiants diplômés spécialisés en technologie des capteurs dans les institutions canadiennes d'enseignement supérieur et de recherche. Si des diplômés ne reçoivent pas immédiatement la formation voulue, leur nombre sera insuffisant lorsque viendra le temps, pour l'industrie, de commercialiser les résultats des recherches et d'incorporer la technologie émergente dans les nouveaux systèmes et les nouveaux procédés de détection. L'industrie canadienne sera peut-être alors contrainte d'importer les experts voulus de l'étranger ou de lancer une coûteuse opération de "rattrapage".

L'industrie canadienne ne semble pas en général accorder beaucoup d'importance aux technologies émergentes, du moins pas autant qu'elle ne le devrait compte tenu des incidences possibles de ces technologies. A défaut d'un certain changement d'attitude, beaucoup d'industries devront peut-être faire face, plus tard, à une concurrence beaucoup plus sérieuse ou risqueront même de se faire supplanter par des entreprises de l'extérieur qui auront adopté la nouvelle technologie afin d'accroître leur efficacité et leur productivité.

En outre, les concepteurs et les fabricants de systèmes et d'instruments de contrôle des procédés risquent de laisser filer d'excellentes occasions s'ils négligent d'incorporer les technologies émergentes des capteurs dans leurs nouveaux produits. Comme le soulignait M. C. Simon, directeur du développement technologique à la société Shell Canada, "les nouveaux capteurs comptent parmi les technologies émergentes les plus importantes pour beaucoup d'industries à cause des possibilités d'amélioration de la qualité et de la productivité qu'ils

présentent et de leur aptitude à effectuer des tâches aujourd'hui difficiles ou même impossibles."

Pour que les Canadiens puissent bien saisir l'importance des technologies émergentes des capteurs et qu'ils n'aient pas à subir, plus tard, les conséquences de leur indifférence actuelle, certaines mesures doivent être prises immédiatement. Selon les résultats de la présente enquête, voici quels semblent être les besoins les plus pressants :

- tenue d'ateliers sur les technologies des capteurs;
- étude des progrès réalisés dans ce domaine à l'échelle internationale;
- mise sur pied d'un centre permettant l'accès "en direct" aux informations sur la technologie des capteurs;
- promotion d'une meilleure prise de conscience, chez les Canadiens, des possibilités offertes.

Nos recommandations seront présentées en fonction de ces différentes rubriques.

Tenue d'ateliers

Devrait-on consacrer un effort particulier, à l'échelle nationale, à la tenue d'ateliers, de colloques et de conférences qui inciteraient l'industrie et les institutions de recherche à s'intéresser davantage aux technologies émergentes des capteurs et à partager les résultats obtenus? Selon les experts qui ont participé à l'enquête et aux entrevues menées par l'auteur, un tel effort est nécessaire (tableau 7). Toutefois, la plupart jugent que les ateliers ne devraient pas être axés sur un secteur particulier de l'industrie (tableau 8). Selon la participation prévue, il sera peut-être nécessaire de tenir des ateliers portant sur des aspects particuliers des technologies des capteurs; par exemple, un atelier sur les capteurs à fibre optique, un autre sur les capteurs à semi-conducteur et les capteurs micromécaniques, et un autre sur les capteurs biologiques et chimiques. Il sera peut-être utile de tenir une série d'ateliers combinés d'une journée afin de permettre aux personnes qui s'intéressent à plus d'un aspect de ces technologies de participer à tous les ateliers qui les intéressent. L'auteur recommande donc :

1. Que le Conseil des sciences, en collaboration avec d'autres organismes, parraine des ateliers nationaux sur les technologies émergentes des capteurs.

Activités menées à l'échelle internationale

Le nombre de projets de recherche et de développement sur les technologies des capteurs augmente rapidement en Europe de l'Ouest, au Japon et aux Etats-Unis. Les activités de recherche menées dans ces pays ainsi qu'au Canada devraient faire l'objet d'une surveillance constante. Les renseignements ainsi recueillis devraient être rapidement portés à la connaissance des chercheurs et des industries du Canada. Par ailleurs, cette surveillance pourrait permettre de déterminer les politiques nationales adoptées dans d'autres pays qui contribuent à promouvoir une certaine prise de conscience des technologies émergentes des capteurs et les activités dans ce domaine. L'auteur recommande :

2. Que le ministère des Affaires extérieures, par le biais de ses conseillers en sciences et en technologie et de ses agents de développement technologique en poste à l'étranger, accorde la priorité à la surveillance et à diffusion rapide des informations sur les progrès réalisés à l'étranger dans le domaine des technologies des capteurs qui pourraient être importants pour l'industrie canadienne.

Centre pour l'accès "en direct" aux informations sur les technologies des capteurs

L'industrie canadienne doit saisir l'occasion unique qui lui est offerte de tirer profit de l'évolution actuelle des technologies des capteurs, précisément du fait de leur nature émergente. D'importants revenus pourront être réalisés par les industries et les

Tableau 7. Besoin d'ateliers sur les technologies des capteurs

Répondants	Oui	Non	?[1]
Chercheurs	17	-	3
Industrie	22	9	7
Gouvernements	4	-	2
Experts-conseils	6	1	-
Totaux	49 (69 %)	10 (14 %)	12 (17 %)

Question : Jugeriez-vous utile que le Conseil des sciences du Canada organise des ateliers sur les technologies émergentes des capteurs?

Nota :
1. ? = pas de réponse

Source : questionnaire de l'auteur

Tableau 8. Besoin d'ateliers axés sur le secteur industriel

Répondants	Oui	Non
Chercheurs	6	11
Industrie	8	14
Gouvernements	-	4
Experts-conseils	3	3
Totaux	17 (35 %)	32 (65 %)

Question : Dans l'affirmative, ces ateliers devraient-ils être axés sur un secteur particulier de l'industrie?

Source : questionnaire de l'auteur

fabricants qui consacreront une partie de leurs efforts à l'incorporation des nouvelles technologies des capteurs pour la fabrication, à coût réduit, de produits efficaces et de systèmes qui améliorent la productivité et la qualité. Il paraît indéniable que les entreprises et les pays qui mettront au point de telles stratégies en retireront des avantages économiques sensibles et propres à justifier leurs efforts bien au-delà de la fin du siècle.

Finalement, l'utilisation de ces technologies émergentes des capteurs pour la revitalisation de nos industries fondées sur les ressources présentera peut-être également d'importants avantages stratégiques pour notre pays. Des systèmes de détection améliorés pourront favoriser l'élaboration de techniques d'extraction et de transformation plus efficaces. Il en découlera une augmentation de la productivité et une baisse des coûts de production qui permettront à nos industries de pratiquer des prix plus concurrentiels.

Beaucoup des experts canadiens des technologies des capteurs seraient favorables à la création d'un Centre canadien de la technologie des capteurs (tableau 9). On semble en général opter pour la mise sur pied d'un centre ou d'un institut qui prendrait la forme d'un réseau de communications "en direct" plutôt que d'une organisation regroupée en un même lieu physique.

L'auteur a discuté de cette notion de réseau de communications "en direct" avec beaucoup des experts interviewés dans le cadre de la présente étude et il a beaucoup réfléchi aux fonctions d'un tel système et aux services qu'il pourrait fournir (tableau 10). Les personnes qui ont répondu au questionnaire de l'auteur ont également souvent abordé cette question.

Grâce aux possibilités offertes par les micro-ordinateurs et les réseaux de communication de paquets, un institut interactif "sans limites physiques" pourrait présenter un certain nombre d'avantages :

- permettre l'accès à une base de données sur les technologies des capteurs émergentes et disponibles sur le marché;
- pouvoir donner accès à une base de données sur les activités canadiennes et internationales de recherche et de développement;
- annoncer les conférences, colloques et expositions portant sur les technologies des capteurs;
- améliorer les communications entre les chercheurs et les utilisateurs;
- améliorer le transfert de la technologie entre les concepteurs et les fabricants;
- améliorer les communications entre les utilisateurs qui ont des besoins précis et ceux qui travaillent à la conception des capteurs;
- renseigner sur les applications des capteurs et sur les services d'experts-conseils.

L'auteur recommande :

3. Que le ministère d'Etat chargé des Sciences et de la Technologie entreprenne une étude de faisabilité visant à évaluer l'opportunité de mettre sur pied un Centre canadien de la technologie des capteurs et à en déterminer les fonctions.

Promotion des technologies des capteurs au Canada

Les Canadiens doivent prendre davantage conscience des possibilités offertes par les technologies des capteurs. Les organisations professionnelles et scientifiques nationales doivent pour cela tenir des assemblées portant sur les activités de recherche dans le domaine des technologies des capteurs. Une telle prise de conscience pourrait contribuer à stimuler la recherche et le développement, les discussions et les interactions entre diverses disciplines et divers secteurs. L'auteur recommande :

Tableau 9. Besoin d'un Centre canadien de la technologie des capteurs

Répondants	Oui	Non	?[1]
Chercheurs	12	6	2
Industrie	13	19	6
Gouvernements	5	1	-
Experts-Conseils	6	1	-
Totaux	36 (51 %)	27 (38 %)	8 (11 %)

Question : Jugeriez-vous utile la création d'un Centre canadien de la technologie des capteurs?

Nota :
1. ? = pas de réponse

Source : enquête de l'auteur

Tableau 10. Fonctions d'un Centre canadien de la technologie des capteurs

	R-D		Info.		Exp.		Educ.	
Répondants	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non
Chercheurs	11	1	11	1	8	4	11	1
Industrie	11	2	13	-	11	2	13	0
Gouvernements	5	-	5	-	5	-	3	2
Experts-conseils	5	1	5	1	2	4	5	1
Totaux	32	4	34	2	26	10	32	4

Question : Dans l'affirmative, quelles devraient être les fonctions de ce Centre canadien de la technologie des capteurs pour l'industrie canadienne? (recherche et développement (R & D), dissémination des informations techniques (Info.), services d'experts-conseils (Exp.), colloques éducatifs (Educ.)).

4. Que l'Institut canadien des ingénieurs, l'Institut de chimie du Canada, l'Association canadienne des physiciens et d'autres organisations nationales semblables de sciences et de génie consacrent des sessions spéciales à la technologie des capteurs à l'occasion de leurs conférences annuelles.

En outre, le secteur privé lui-même doit également indiquer la voie à suivre aux chercheurs universitaires et contribuer à une meilleure prise de conscience des possibilités des technologies émergentes des capteurs et des dangers qu'elles peuvent présenter. L'auteur recommande :

5. Que l'Association des manufacturiers canadiens et les diverses autres associations professionnelles pertinentes informent leurs membres des possibilités que présentent les technologies émergentes des capteurs et qu'elles contribuent à déterminer les secteurs où l'aide gouvernementale pourrait le mieux contribuer à la mise sur pied d'un centre ou d'un institut et à l'élaboration de programmes de diffusion des résultats des travaux fondamentaux de R-D et de la technologie axés sur les applications particulières des capteurs au Canada.

NOTES

1. Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994 (Palo Alto, Market Intelligence Research Company, 1985).

2. Information obtenue auprès de l'Institut canadien de l'information scientifique et technique, au Conseil national de recherches.

3. M. Eleccion, "Sensors Tap IC Technology to add more Functions", Electronics (juin 1986), p. 26-30.

4. Ibid.

5. Sensors : Market Research Catalog/Spring 1986 (Palo Alto, Market Intelligence Research Company, 1986).

6. Ibid.

7. B.E. Jones, "Optical Fibre Sensors and Systems for Industry", Journal of Physics E : Scientific Instruments, 18(1985), p. 770-781.

8. Sensors : Market Research Catalog/Spring 1986, op. cit. note 5.

9. Ibid.

10. R.R. Diles, "High Temperature Optical Fibre Thermometer", Journal of Applied Physics, 54(1983), p. 1198-1201.

11. K. Wickersheim et M. Sun, "Phosphor and Fibre Optics Remove Doubt from Difficult Temperature Measurements", Research and Development (novembre 1985), p. 114.

12. H. Bigelow, "Optical Tunneling Sensor Detects ppB", Lasers & Applications (avril 1986), p. 18.

13. D. Pinchbeck et C. Kitchen, "Optical Fibres for Cryogenic Leak Detection", Proceedings of the Conference on PROMECON, Process Measurement and Control Conference (PROMECON), Institute of Measurement and Control, Londres, 19-22 juin 1984 (Londres, 1984).

14. E. Udd et coll., "Fibre-optic Rotation Sensors move into the Field for Evaluation", dans Digest of the 3rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 3e Conférence internationale sur les capteurs à fibre optique, Optical Society of America, San Diego, Californie, 13-14 février 1985 (San Diego, 1985).

15. Ibid.

16. A. Linge et coll., "Multichannel Fibre-optic Scanner", Digest of the 3rd International Conference on Optical Fibre Sensors, op. cit. note 14.

17 B.E. Jones, op. cit. note 7.

18. Fibre Optic Sensor Markets II 1984-1994, op. cit. note 1.

19. L. Waller, "Optical-Fibre Sensors Are about to Hit the Market", Electronics (30 septembre 1985).

20. Narayanaswarmy, "Sensing Chemicals with Optical Fibres", Instrument and Control (mars 1986), p. 35-36.

21. T. Farre, "The View from Japan", Lasers & Applications (janvier 1986), p. 52.

22. B.E. Jones, op. cit. note 7.

23. J.B. Angell, S.C. Terry et P.W. Barth, "Silicon Micromechanical Devices", Scientific American, 248, 4(1983), p. 44-55.

24. Ibid.

25. Ibid.

26. Ibid.

27. R. Brandt, "Micromechanics : The Eyes and Ears of Tomorrow's Computer", Business Week (17 mars 1986), p. 88-89.

28. Ibid.

29. Ibid.

30. Ibid.

31. Ibid

32. Ibid.

33. Ibid.

34. Ibid.

35. M.D. Weiss, "Chemical-sensitive Transducers : A New Breed of Miniature Sensors", InTech (juin 1985), p. 45.

36. Ibid.

37. Ibid.

38. Ibid.

39. Ibid.

40. Ibid.

41. B.A. Bott et T.A. Jones, "A Highly Sensitive NO_2 Sensor Based on Electrical Conductivity Changes in Phtlalocyanine Films", Sensors and Actuators, 1(1984), p. 43-53.

42. Ibid.

43. C. Nylander, M. Armgarth et I. Lundstrom, "An Ammonia Detector based on Conducting Polymer", Proceedings of the International Meeting on Chemical Sensors, colloque international sur les capteurs chimiques, Fukuoka, Japon, 19-22 septembre 1983 (Amsterdam, Elsevier, 1983), p. 203-7.

44. H. Freiser (éd.), Ion-selective Electrodes in Analytical Chemistry (New York, Plenum Press, 1980), p. 85-105.

45. Ibid.

46. G. Fisher, "Ceramic Sensors : Providing Control through Chemical Reactions", Ceramics Bulletin, 65(1986), p. 622-629.

47. J.E. Brignell, "The Sensor Revolution," Physics Bulletin, 36(1985).

48. Ibid.

49. Ibid.

50. Ibid.

51. Ibid.

52. Ibid.

53. P.S. Sen, "Future Looks Bright for High-performance Ceramics", Research and Development (juillet 1986), p. 67-68.

54. Ibid.

55. V. Owen,"Biosensors", Sensor Review (janvier 1985), p. 20-24.

56. Ibid.

57. M. Shichiri et coll., "Wearable Artificial Endocrine Pancreas with Needle-type Glucose Sensor", The Lancet (novembre 1982), p. 1129-1131.

58. V. Owen, op. cit. note 55.

59. S. Yanchinski, "Biochips Speed up Biochemical Analysis," New Scientist (28 janvier 1982), p. 236.

60. V. Owen, op. cit. note 55.

61. Ibid.

62. Yanchinski, op. cit. note 60.

63. T.M. Freman et W.B. Seitz, "Chemiluminescence Fibre Optic Probe for Hydrogen Peroxide Based on Luminol Reaction", Analytical Chemistry, H150(1978), p. 1242-1246.

64. J. Wannlund et M. DecLuca, "A Sensitive Bioluminescent Immunoassay for Dinitrophenol and Trinitrotoluene", Analytical Chemistry, HI122(1982), p. 385-393.

65. K. Mosbach, C.F. Mandenius et B. Danielsson, "New Biosensor Devices", Biotech 83. Proceedings of the International Conference on Applied Biotechnology, Biotech 83. Conférence et exposition internationales sur l'exploitation commerciale de la biotechnologie, Online Conferences Ltd., Londres, 4-6 mai 1983 (Londres, 1983), p. 665-678.

66. G.G. Guibault, "Determination of Formaldehyde with an Enzyme Coated Piezoelectrical Crystal Detector", Analytical Chemistry, 55(1983), p. 1682-1684.

67. Sensors : Market Research Catalog/Spring 1986, op. cit. note 5.

ANNEXES

ANNEXE A. CONFERENCES SUR LES TECHNOLOGIES DES CAPTEURS ET ORGANISATIONS INTERESSEES

CONFERENCES

Les conférences énumérées ci-après étaient en partie ou entièrement consacrées aux technologies émergentes des capteurs.

Transducers '87, Institut japonais de génie électrique, Fondation pour l'avancement de la science internationale, Tokyo, du 2 au 5 juin 1987.

4e Conférence internationale sur les capteurs à fibre optique, Optical Society of America, Tokyo, du 7 au 9 octobre 1986.

Fibre '86, Fibre Optics, Optoelectronics and Laser Applications in Science and Engineering, Société internationale de génie optique, Cambridge, Massachusetts, du 21 au 26 septembre 1986.

Sensors Expo, North American Technologies, Chicago, du 17 au 19 septembre 1986.

Applying Sensors in Robot Applications, Society of Manufacturing Engineering, (ville inconnue) du 10 et 11 septembre 1986.

30e colloque technique international annuel sur le génie optique et optoélectronique, SPIE (Société internationale de génie optique) San Diego, Californie, du 17 au 22 août 1986.

Current and Future Technology in Agricultural Sensors and Applications, American Society of Agricultural Engineers, San Luis Obispo, Californie, du 29 juin au 2 juillet 1986.

WESCON '85, Integrated Sensor Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers, San Francisco, du 19 au 22 novembre 1985.

RoVISeC 5, 5e Conférence internationale sur la vision artificielle et les contrôles sensoriels, Institut Royal de génie des Pays-Bas, Société pour le génie de la production, Amsterdam, du 29 au 31 octobre 1985.

Sensors and their Applications, Institute of Physics, Southampton, Royaume-Uni, du 10 au 12 septembre 1985.

Transducers '85, (parrain inconnu), Philadelphie, du 11 au 14 juin 1985.

Sensor '85, Société de génie manufacturier, Karlsruhe, Allemagne de l'Ouest, du 21 au 23 mai 1985.

Symposium on Biosensors, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, National Science Foundation, Los Angeles, du 15 au 17 septembre 1984.

Transducers '83, (parrain inconnu), Delft, Pays-Bas, du 31 mai au 8 juin 1983.

ORGANISATIONS

Plusieurs organisations ont également été mises sur pied au cours des récentes années pour contribuer à la recherche et au développement ou au transfert de la technologie des capteurs à l'industrie.

Optical Sensors Collaborative Association (Royaume-Uni), Chemical Sensing Group
Ce groupe a pour objectif de promouvoir l'utilisation des techniques d'électro-optique et de fibres optiques dans le domaine de la technologie des capteurs chimiques.

Personne-ressource : Mme P. West, gestionnaire, OSCA, Sira Ltd., South Hill, Chiselhurst, Kent BR7 5EH, Royaume-Uni.

Optical Sensor Research Unit
Neuf entreprises britanniques importantes se sont jointes à l'Institut des sciences et de la technologie et au département de l'industrie et du commerce de l'Université de Manchester pour former le Optical Sensor Research Unit. Ils ont mis sur pied un centre industrie-université pour l'étude des capteurs intégrés. Le groupe poursuivra des

recherches sur les dispositifs chimiosensibles à fibre optique.

Adresse : Optical Sensor Research Unit, Department of Instrumentation and Analytical Science, University of Manchester Institute for Science and Technology, C.P. 88, Manchester M60 1QD, Royaume-Uni.

Center for Sensor Technology
L'Université du Utah a mis sur pied un centre d'étude sur la technologie des capteurs. L'objectif du centre est de consolider la R-D portant sur les systèmes de détection et sur leur production le plus tôt possible au cours de leur mise au point. On travaillera à cette fin à intégrer les notions d'électronique, de chimie, de physique et de biologie et d'étudier et de mettre en application les principes physiologiques et biochimiques de la détection.

Personne-ressource : M. Jiri Janata, directeur, Center for Sensor Technology, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112, Etats-Unis.

Sensors and Instruments Division, GEC
Le Centre de recherches Marconi possède une division des capteurs et des instruments à l'intérieur de la GEC Research. Cette division a pour objectif principal de poursuivre des recherches et de promouvoir l'adoption de capteurs et de techniques de détection auprès des nombreuses entreprises de fabrication du groupe GEC. La division effectue en outre des travaux de R-D, sous contrat, pour d'autres entreprises.

Personne-ressource : M. G.J. Jordan, gestionnaire, Sensors and Engineering Systems Laboratory, Marconi Research Center, West Hanningfield Road, Great Baddow, Chelmsford, Essex CM2 8HN, Royaume-Uni.

Institut Fraunhofer de technologie des mesures physiques
L'Institut Fraunhofer a mis au point des capteurs optiques et électroniques pour le contrôle des produits et des procédés. Ces détecteurs servent à déterminer la température, la force exercée, la distance, l'humidité, la pression, la composition chimique et le débit. L'institut tire de 70 à 80 % de son fonds de roulement de ses travaux contractuels.

Personne-ressource : Dr Rainer Kist, Fraunhofer-Institut fur Physikalische MeBtechnik, Heidenhofstrabe8, D-7800 Freiburg, R.F.A.

Institut Battelle
L'institut Battelle compte deux centres européens : Francfort, en Allemagne de l'Ouest, et Genève, en Suisse. Le groupe de Francfort travaille à la solution de problèmes d'automatisation avec l'aide de capteurs intelligents et de dispositifs micro-électroniques, met au point de nouveaux capteurs, poursuit des études et des consultations dans le domaine des capteurs et construit une base de données. Les activités du groupe de Genève sont semblables à celles du groupe de Francfort mais ce groupe jouit également d'une certaine expérience dans le domaine des capteurs biomédicaux et des capteurs à fibre optique.

Institut de technologie de Tokyo
L'Institut de technologie de Tokyo consacre ses énergies à la R-D sur les capteurs biologiques. Il est financé principalement par les ministères de l'Education, du Commerce international et de l'Industrie et de l'Agriculture. Un certain nombre des capteurs qu'il a mis au point sont disponibles sur le marché. Récemment, il a mis au point un dispositif de commutation à

"bio-puce" photosensible, à partir de protéines bactériennes.

Cambridge Consultants Ltd.

La Cambridge Consultants Ltd. est une filiale de la société Arthur D. Little. Le groupe de biophysique travaille principalement à la mise au point de capteurs à fibre optique pour la fabrication d'instruments servant aux recherches en biotechnologie. Au nombre des applications intéressantes de ces dispositifs, mentionnons la gestion des effluants, le contrôle de la biodétérioration et la détection des explosifs dans le domaine militaire.

Center for Sensor Technology

Ce centre fait partie de l'Ecole de génie et de sciences appliquées de l'Université de la Pennsylvanie.

Personne-ressource : Jay N. Zemel, RCA Professor of Solid State Electronics and Director, Center for Sensor Technologies, School of Engineering and Applied Science, University of Pennsylvania, Philadelphie, PA 19104-6390, Etats-Unis.

ETUDES

Les technologies des capteurs ont également fait l'objet d'un certain nombre d'études au cours des deux ou trois dernières années.

Base de données sur les capteurs

Le Fachinformationszentrum Technik a demandé à l'Institut Battelle de Francfort d'établir une base de données sur les capteurs utilisés en génie mécanique. Chaque capteur est classé selon un système uniforme de catégories. Cette base de données a commencé à fonctionner en 1985.

Personne-ressource : M^me^ Renate Siebrasse, Battelle Institut Ltd., 15 Hanover Square, Londres W1R 9AJ, Royaume-Uni.

Etude sur les capteurs à fibre optique à l'échelle mondiale

La société ERA Technology de Leatherhead, Surrey (Royaume-Uni), a terminé une étude des activités menées dans le monde et portant sur les capteurs à fibre optique. Elle a examiné plus de 400 articles techniques et brevets. Les résultats de l'étude sont présentés en trois volumes : I. Marchés (introduction portant sur la technologie et les capteurs actuellement disponibles, description des activités de R-D à travers le monde, comparaison des technologies concurrentes fondées sur les semi-conducteurs et les céramiques); II. Technologie (comparaison des facteurs communs relevés dans les articles de recherche); III. Bibliographie.

Personne-ressource : M. Peter Baker (commercialisation), D^r^ Andrew MacGregor (technologie), ERA Technology Ltd., Cleeve Road, Leatherhead, Surrey, KT22 7SA, Royaume-Uni.

Etude des progrès réalisés au Japon dans le domaine des capteurs

L'Institut de recherche de l'Institut de technologie de l'Illinois (IITRI) est en train de parachever une étude de deux ans portant sur les entreprises japonaises qui produisent des capteurs commerciaux et qui travaillent dans le domaine des nouvelles technologies. Selon cet institut, dont le siège est à Chicago, les capteurs déjà utilisés au Japon pourraient stimuler grandement les développements technologiques dans plusieurs secteurs industriels. Malgré une forte demande en faveur de dispositifs

de détection fiables et peu coûteux, la technologie des capteurs n'a pas progressé aussi rapidement que la technolgie de la transformation. Les recherches en technologie avancée des capteurs permettront de tirer profit des progrès déjà réalisés dans les domaines des procédés industriels et du contrôle de la gestion, du traitement des données, de l'équipement de bureau et des instruments médicaux. Les résultats préliminaires de l'étude de l'IITRI semblent indiquer que le Japon a réussi à adapter les technologies existantes dans le monde pour produire d'excellents capteurs pour ses marchés intérieurs. Actuellement, environ 400 entreprises japonaises fabriquent des produits utilisant des capteurs. La plupart de ces entreprises sont petites. Les clients abonnés à l'IITRI paient 9 000 dollars par année pour recevoir des rapports trimestriels fournissant des informations sur cinq catégories de capteurs : capteurs thermosensibles; détecteurs électromagnétiques; détecteurs d'ondes et de radiations; capteurs mécaniques; capteurs chimiques et capteurs biochimiques. L'IITRI collabore avec la société Yanase and Associates Inc., une firme de recherches techno-économiques interdisciplinaires de Tokyo.

Personne-ressource : Bob Levi, Technology Assessment and Business Analysis Group, IIT Research Institute, 10 West 35th Street, Chicago, IL 60616, Etats-Unis.

Etudes sur le marché des capteurs

La société Market Intelligence Research a préparé un certain nombre de rapports sur le marché des capteurs dont le prix varie de 195 $ à 1 690 $ U.S. Au nombre des sujets abordés, mentionnons les marchés de la vision artificielle, des transducteurs industriels et des capteurs à fibre optique, une analyse du marché des capteurs biomédicaux et des capteurs à électrodes, le marché des capteurs thermosensibles à infrarouge, les capteurs à fibre optique et le marché médical et les marchés des instruments de détection de l'humidité.

Adresse : Market Intelligence Research Company, 4000 Middlefield Road, Palo Alto, CA 94303, Etats-Unis.

ANNEXE B. PERSONNES INTERVIEWEES

Henry Baltes
Directeur
Alberta Microelectronics Centre
Edmonton (Alberta)

Alex Curran
Président
SED Systems Inc.
Saskatoon (Saskatchewan)

John Dewey
Sous-ministre
Ministry of Post-Secondary Education
Victoria (Colombie-Britannique)

Denzil Doyle
Président
DoyleTech Corporation
Ottawa (Ontario)

Ron Freedman
Expert-conseil
Toronto (Ontario)

R.F. Frindt
Professeur
Université Simon Fraser
Vancouver (Colombie-Britannique)

Larry Gelmon
Agent de programme principal
Centre de recherches pour le développement international
Ottawa (Ontario)

Vida Ghaemmaghami
Département de chimie
Université de Toronto
Toronto (Ontario)

Keith Harman
Président
SenStar Corporation
Kanata (Ontario)

Jim Hutch
Président
Saskatchewan Research Council
Saskatoon (Saskatchewan)

Trevor Jubb
Directeur général adjoint
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie
Energie, Mines et Ressources
Ottawa (Ontario)

K. Kallury
Département de chimie
Université de Toronto
Toronto (Ontario)

J.P. Legendre
Section de génie électronique
Conseil national de recherches
Ottawa (Ontario)

Pierre Lemoyne
Directeur de la production
Guildline Instruments Inc.

R.W. Olmstead
Président
Conservation Energy Systems
Saskatoon (Saskatchewan)

N. Ramanathan
Physicien principal
Picker International Canada Inc.
Bramalea (Ontario)

George E. Ruddle
Section du façonnage des métaux
Energie, Mines et Ressources
Ottawa (Ontario)

Saul Silverman
Président
Sylverman Consulting Services
Ottawa (Ontario)

A. Strifler
Président
Anatel Optronics Inc.
Burlington (Ontario)

Joseph Tedesco
Département de chimie
Université de Toronto
Toronto (Ontario)

Le Conseil des sciences du Canada est un organisme consultatif national en matière de politique scientifique et technologique. Ses principales fonctions consistent à :

- étudier les questions de politique scientifique et technologique;
- recommander des lignes d'action au gouvernement;
- sensibiliser les Canadiens à l'importance des sciences et de la technologie dans leur vie;
- encourager le débat entre les autorités publiques, les chefs d'entreprises et les établissements universitaires au sujet de la politique scientifique et technologique.